# UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

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

Marco Vinicio Pucha Tambo

Nota del autor
Marco Vinicio Pucha Tambo, Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.
Director PhD. Edilberto Llanes Cedeño
Codirector Ing. Jaime Molina Osejos, M.Sc.
Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:
mpucha.mdm@uisek.edu.ec

# DECLARACION JURAMENTADA

Yo, MARCO VINICIO PUCHA TAMBO, con cédula de identidad 1104677305, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

MARCO VINICIO PUCHA TAMBO
C.I.: 110467730 - 5

# ÍNDICE

**DECLARACION JURAMENTADA** ..... 2

**ÍNDICE** ..... 3

**LISTA DE FIGURAS** ..... 6

**LISTA DE TABLAS** ..... 8

**LISTA DE ECUACIONES** ..... 8

**DEDICATORIA** ..... 9

**GLOSARIO** ..... 10

**RESUMEN** ..... 12

**ABSTRACT** ..... 13

**INTRODUCCION** ..... 14

Antecedentes ..... 14

Planteamiento del problema ..... 16

Justificación ..... 18

Estado del arte ..... 21

Fabricación Aditiva ..... 24

Tipos de fabricación aditiva. ..... 25

Materiales para la fabricación aditiva. ..... 26

Aplicaciones de la fabricación aditiva. ..... 27

Proceso PolyJet ..... 28

Ventajas de la impresión 3D PolyJet. ..... 29

Materiales compuestos ..... 30

Partes de un material compuesto. ..... 30

Matriz. ..... 31

Refuerzo. ..... 32

Partículas. ..... 32

Fibras. ..... 32

Interfaz. ..... 33

Clasificación de los materiales compuestos. ..... 34

Características de los materiales compuestos. ..... 35

Características de materiales compuestos reforzados con fibras. ..... 35

Influencia de la orientación de la fibra. ..... 35

Influencia de la cantidad de la fibra. ..... 37

Propiedades mecánicas de las fibras naturales. ..... 37

Aplicación de materiales compuestos. 38

**METODO** 39
Tipo de Estudio 39
Modalidad de investigación 39
Metodología 39
Materiales 41
Materiales constitutivos del composite. 41
Análisis de los elementos constitutivos del composite. 41
Fibra de abacá. 41
Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de abacá. 41
Cálculo de la densidad de fibra de abacá. 42
Fibra de cabuya. 43
Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de cabuya. 43
Cálculo de la densidad de fibra de cabuya. 44
Matriz Fotopolimérica. 44
Cálculo de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo del composite. 46
Regla de las mezclas para compuestos reforzados por fibras. 46
Manufactura aditiva del composite 47
Desarrollo del modelo geométrico de las probetas. 47
Dimensiones de la probeta de flexión. 47
Fabricación aditiva de las probetas a ensayar. 48
Fabricación aditiva de probetas de flexión con material base. 48
Fabricación aditiva de probetas de flexión de material compuesto reforzado con fibras de abacá. 48
Fabricación aditiva de probetas de flexión de material compuesto reforzado con fibras de cabuya. 48
Equipos 49
Máquina universal de ensayos 49
Impresora 3D 49
Estufa 50
Microscopio Electrónico de Barrido 50

**RESULTADOS** 52
Resultados del ensayo de flexión del material matriz 52
Datos resultantes del ensayo de flexión del material matriz. 52
Microscopia Electrónica de barrido del material matriz. 54
Resultados del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de abacá 55
Datos resultantes del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de abacá. 56
Microscopia Electrónica de barrido del composite reforzado con fibra de abacá. 58
Resultados del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de cabuya 59

Datos resultantes del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de cabuya. ..... 59
Microscopia Electrónica de barrido del composite reforzado con fibra de abacá..... 61
Resultados de la simulación estructural de las rejillas de aire acondicionado ..... 62
Rejillas de aire acondicionado de Polipropileno. ..... 62
Rejillas de aire acondicionado del Material matriz de los composites. ..... 64

**DISCUSION DE RESULTADOS**..... 66
Esfuerzo máximo de flexión ..... 66
Módulo de Elasticidad a la Flexión..... 70
Deflexión ..... 73
Comparación de propiedades mecánicas de flexión de materiales compuestos mediante impresión 3D con otros materiales. ..... 75

**CONCLUSIONES**..... 79

**RECOMENDACIONES**..... 81

**BIBLIOGRAFIA**..... 82

**ANEXOS**..... 87
Anexo – A ..... 87
Anexo - B ..... 88

## Lista de Figuras

*Figura 1.* Ventas anuales de vehículos en el Ecuador en los años 2013 – 2017; (Anuario AEADE 2017) ..... 17
*Figura 2.* Análisis CFD de los dos tipos de rejillas de ventilación (Estable y dinámica); (Limaye et al., 2012) ..... 22
*Figura 3.* Aplicación de la fuerza de posicionamiento en las rejillas de ventilación del sistema Aire acondicionado; (https://blog.ocasionplus.com/cinco-errores-evitar-aire-acondicionado/) ..... 23
*Figura 4.* Proceso de impresión 3D – Fabricación Aditiva; (Berchon & Luyt, 2016) ..... 26
*Figura 5.* Pala de turbina con canales de refrigeración internos producidos por sinterización láser de metal; (Guo & Leu, 2013) ..... 28
*Figura 6.* Montaje final de un colector de admisión fabricado por modelado por deposición fundida; (Guo & Leu, 2013) ..... 28
*Figura 7.* Proceso de funcionamiento de tecnología PolyJet; (Berchon & Luyt, 2016) ..... 29
*Figura 8.* Componentes de un material compuesto; (Guerrero et al., 2011) ..... 31
*Figura 9.* Clasificación de materiales compuestos en función de los tipos de refuerzos*; (Guerrero et al, 2011)* ..... 34
*Figura 10.* Distintas configuraciones y características del refuerzo en un material compuesto tales como: a) concentración, b) tamaño, c) forma, d) distribución y e) orientación; (Callister, 2007) ..... 35
*Figura 11.* Orientaciones posibles del refuerzo en un material compuesto tales como: a) fibras continuas y alineadas, b) fibras discontinuas y alineadas, y c) fibras discontinuas orientadas aleatoriamente; (Callister, 2007) ..... 36
*Figura 12.* Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E; (Askeland, 1998) ..... 37
*Figura 13.* Industrias de aplicación de materiales compuestos; (Guerrero et al., 2011) ..... 38
*Figura 14.* Pasos de la Metodología ..... 40
*Figura 15.* Fibra de abacá ..... 41
*Figura 16.* Fibra de cabuya ..... 43
*Figura 17.* Material Matriz ..... 45
*Figura 18.* Dimensiones de probeta de flexión ..... 47
*Figura 19.* Fabricación aditiva de probeta de flexión con material base ..... 48
*Figura 20.* Fabricación aditiva de probeta de flexión del composite reforzado con fibras de abacá ..... 48
*Figura 21.* Fabricación aditiva de probeta de flexión del composite reforzado con fibras de cabuya ..... 49
*Figura 22.* Máquina universal de ensayos. ..... 49
*Figura 23.* Impresora 3D de tecnología PolyJet; (http://3dmanufacturing.mx/fichas/objet30-pro-ESLA-09-13.pdf) ..... 50
*Figura 24.* Estufa para secado de fibras; (https://www.pol-eko.com.pl/wp-content/uploads/2016/08/SLN- 53.jpg) ..... 50
*Figura 25.* Microscopio Electrónico de Barrido; (http://www.sietronics.com.au/acexpress.pdf) ..... 51
*Figura 26.* Siemens NX 10; (https://www.google.com/search?q=nx+10+siemens&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiH7t7kh_vcAhVF0FkKHSovAJkQ_AUICigB&biw=1366&bih=654#imgrc=FD9G6-EpvZMPbM.) ..... 51
*Figura 27.* Probetas ensayadas del material matriz ..... 52
*Figura 28.* Resultados gráficos del ensayo de flexión aplicado al material matriz del composite; (Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua) ..... 54
*Figura 29.* Resina fotopolimérica, material matriz de los materiales compuestos. a) 26X, b) 50X, c) 100X y d) 250X. ..... 55
*Figura 30.* Probetas ensayadas del composite reforzadas con fibra de abacá ..... 56

*Figura 31.* Resultados gráficos del ensayo de flexión aplicado al composite reforzado con fibra de abacá; (Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua) ..... 57
*Figura 32.* Material compuesto reforzado con fibra de abacá. a) 25X, b) 50X, c) 100X y d) 250X. ..... 58
*Figura 33.* Probetas ensayadas del composite reforzadas con fibra de cabuya ..... 59
*Figura 34.* Resultados gráficos del ensayo de flexión aplicado al composite reforzado con fibra de cabuya; (Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua). ..... 61
*Figura 35.* Material compuesto reforzado con fibra de cabuya. a) 28X, b) 50X, c) 100X y d) 250X. . 62
*Figura 36.* Grafica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado ..... 63
*Figura 37.* Grafica de esfuerzos generados en las rejillas de aire acondicionado ..... 63
*Figura 38.* Grafica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado ..... 64
*Figura 39.* Grafica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado ..... 65
*Figura 40.* Idealización para el cálculo de la carga aplicada a las rejillas de aire acondicionado ..... 65
*Figura 41.* Comparación de medias con el 95% por la prueba LSD. ..... 67
*Figura 42.* Esfuerzo máximo de flexión de materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo. ..... 67
*Figura 43.* a) Microscopia de material compuesto reforzado con Abacá, b) Microscopia de material compuesto reforzado con Cabuya. ..... 69
*Figura 44.* Probeta de material compuesto reforzado con fibra de Abacá luego del ensayo de flexión ..... 69
*Figura 45.* Probeta de material compuesto reforzado con fibra de Abacá luego del ensayo de flexión ..... 70
*Figura 46.* Grafico Caja y Bigotes para el módulo de elasticidad a la flexión ..... 71
*Figura 47.* Módulo de elasticidad a la flexión de materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo. ..... 71
*Figura 48.* Grafico Caja y Bigotes para la deflexión. ..... 74
*Figura 49.* Deflexión de materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo. ..... 74
*Figura 50.*Comparación de las propiedades mecánicas a flexión de distintos materiales. ..... 77

**Lista de Tablas**

Tabla 1. *Principales materiales para la fabricacion aditiva* ..... 27
Tabla 2. *Tipos de matrices utilizadas en materiales compuestos*. ..... 31
Tabla 3. *Tipos de fibras utilizadas en materiales compuestos.* ..... 33
Tabla 4. *Propiedades mecanicas de diferentes fibras naturales como refuerzo en compuestos termoplasticos* ..... 38
Tabla 5. *Propiedades fisicas y mecanicas de la fibra de abacà*.. ..... 42
Tabla 6. *Propiedades disicas y mecanicas de la fibra de cabuya* ..... 44
Tabla 7. *Propiedades fisicas y mecanicas del material matriz del composite*..... 46
Tabla 8. *Resultados de ensayo de flexion de material matriz.*..... 53
Tabla 9. *Ensayo de flexion del material compuesto reforzado con fibra de abacà.*..... 56
Tabla 10. *Ensayo de flexion del material compuesto reforzado con fibra de cabuya*.... 60
Tabla 11. *Metodo de las diferencias minimas significativas (LSD) de Fisher, con el 95% de confianza*... ..... 66
Tabla 12. *Metodo de las diferencias minimas significativas (LSD) de Fisher, con el 95% de confianza*. ..... 70
Tabla 13. *Metodo de las diferencias minimas significativas (LSD) de Fisher, con el 95% de confianza* . ..... 73
Tabla 14. *Propiedades mecanicas a flexion de diferentes materiales compuestos y plasticos utilizados en el sector automotriz* ..... 76

**Lista de Ecuaciones**

Ecuación 1. *Densidad de materiales*..... 42
Ecuación 2. *Regla de las mezclas para compuestos reforzados por fibras* ..... 46
Ecuación 3. *Fraccion volumetrica del material matriz* ..... 47

## DEDICATORIA

A mis queridos padres y hermanos  por ser las personas que me han sabido apoyar a lo largo de mi vida en el ámbito académico y personal.

Marco Pucha

## GLOSARIO

AM – Fabricación Aditiva

ASTM – Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

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

**RESUMEN**

Actualmente la creciente tendencia al uso de materiales que sean amigables con el ambiente está posicionándose en el sector automotriz con la finalidad de disminuir el uso de materiales sintéticos que generan altos niveles de contaminación; por tal razón, el objetivo principal de la presente investigación es la caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D para la innovación en la manufactura de autopartes. En primera instancia se aplicó un diseño de investigación tipo experimental, posterior a ello se realizó el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de las fibras refuerzos y la matriz; como también el cálculo de la fracción volumétrica a utilizar en el composite. Seguidamente se fabricó las probetas de los compuestos mediante impresión 3D bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM 790 para ensayos de flexión. Como resultado de la caracterización mecánica de los materiales fabricados se obtuvo que el esfuerzo máximo a flexión de los compuestos reforzados con abacá (77,534 MPa) y cabuya (83,256MPa) disminuyeron con respecto al material matriz (92,77 MPa); por otro lado 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 en la rigidez de los materiales ensayados. Posteriormente se realizó un análisis estadístico comparativo entre las características mecánicas de los compuestos ensayados respecto a otros materiales compuestos o plásticos, de esta manera se pudo concluir que el material compuesto estudiado presenta mejores características mecánicas tomando en cuenta el esfuerzo máximo a flexión vs el módulo de elasticidad en comparación a otros materiales. Finalmente se verifico mediante simulación computacional estructural que las diferencias del material original (Polipropileno) con respecto al material matriz de los composites no presentaron diferencias significativas entre estos.

*Palabras clave: Materiales compuestos, Impresión 3D, Fibras de Abacá, Fibras de Cabuya.*

**ABSTRACT**

Currently, the growing trend towards the use of materials that are friendly to the environment is positioning itself in the automotive sector in order to reduce the use of synthetic materials that generate high levels of pollution; for this reason, the main objective of this research is the characterization of reinforced composite materials with abacà and cabuya fibers by means of 3D printing for innovation in the manufacture of auto parts. For the development of the present study an experimental type research design was applied, in the first instance the analysis of the physical and mechanical properties of the reinforcement fibers and the matrix was carried out; as well as the calculation of the volumetric fraction to be used in the composite. Subsequently, the test specimens of the compounds were manufactured by 3D printing under the established parameters in the ASTM 790 standard for bending tests. As a result of the mechanical characterization of the manufactured materials, it was obtained that the maximum bending stress of the reinforced compounds with abaca (77.534 MPa) and cabuya (83.256MPa) decreased with respect to the matrix material (92.77 MPa); On the other hand, the modulus of elasticity to flexion that had compounds reinforced with abaca (2211.33 MPa) and cabuya (1806.03 MPa) increased with respect to the parent material (1689.64 MPa) which translates into an increase in the rigidity of the materials tested. Later, a comparative statistical analysis was made between the mechanical characteristics of the tested composite materials with respect to other composite or plastic materials, In this way it was possible to conclude that the studied composite material presents better mechanical characteristics taking into account the maximum flexural stress vs. the modulus of elasticity compared to other materials. Finally, it was verified by structural computational simulation that the differences of the original material (Polypropylene) with respect to the matrix material of the composites did not show significant differences between them.

*Key words: Composite materials, 3D Printing, Abaca Fibers, Cabuya Fibers.*

# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes

Bledzki, Faruk y Sperber (2006) en su investigación sobre " Cars from Bio-Fibres" analizan el impacto medio ambiental en los últimos años de la aplicación de las fibras naturales como refuerzo de polímeros en distintos lugares del mundo para la fabricación de autopartes debido a sus características de peso ligero, bajo costo y buenas propiedades mecánicas. Este estudio permite establecer beneficios como la reducción de desperdicios de materiales dado su posibilidad de reciclado, como también la reducción de emisiones contaminantes reduciendo el peso del vehículo lo que se traduce en ahorro de combustible, lo que contribuye a las políticas medioambientales a nivel mundial (Bledzki, Faruk y Sperber, 2006).

Guo y Leu (2013) realizaron una investigación acerca de la "Additive Manufacturing: technology, applications and research needs" en la cual muestran la evolución que ha tenido la fabricación aditiva desde sus inicios hasta la actualidad, como también el desarrollo y aplicación de distintos materiales como: polímeros, metales, cerámicos, etc. para la fabricación de partes que ha tenido un gran impacto y acogida dentro de la industria aeroespacial, biomedicina y automotriz; en esta última se presentan algunas autopartes ejemplares como: colector de escape, alojamiento de la bomba de aceite, bomba de agua y el colector de admisión, desarrolladas a partir de la manufactura aditiva con el uso del método adecuado para su elaboración (Guo y Leu , 2013).

Faruk, Bledzki, Fink y Sain (2014) afirman que en los últimos años la industria automotriz a nivel mundial, está centrada en la elaboración y utilización de materiales compuestos los cuales están integrando fibras naturales como un elemento de refuerzo, para la fabricación de autopartes externas e internas del vehículo, con la finalidad de contribuir al cuidado del medio ambiente y utilizar en forma adecuada la gran variedad de fibras naturales presentes en

los diferentes países del mundo, que presenten las mejores propiedades mecánicas para su aplicación en la fabricación de autopartes (Faruk, Bledzki, Fink y Sain, 2014).

Uno de los objetivos del sector industrial automotriz en todo el mundo, es impulsar el uso de nuevas tecnologías para desarrollar vehículos y autopartes en menor tiempo posible, optimizando recursos para ser competitivos y satisfacer las demandas del usuario en cuanto a mejores de diseño y sus prestaciones, por tal motivo una de las tecnologías que contribuye al desarrollo y optimización de autopartes es la manufactura aditiva con el uso de los diferentes métodos y técnicas para fabricar elementos.

Li y Huang (2014) desarrollaron una investigación sobre la "Application of Rapid Prototyping Technology in Automobile Manufacturing Industry" cuya investigación se refiere a la aplicación de la tecnología de impresión 3D para la fabricación de partes de vehículos, tomando en cuenta los diferentes métodos de prototipado rápido existentes en la actualidad como: estereolitografía (SLA), modelado por deposición fundida (FDM), sinterización selectiva por láser (SLS), etc., los cuales favorecen significativamente a la reducción de tiempos fabricación de autopartes, tomando en cuenta incluso a elementos que presenten complejidad geométrica para su desarrollo. Esto permite que las empresas manufactureras automotrices reduzcan tiempos de producción de elementos lo que se traduce en reducción de costos y obtención de ganancias económicas muy significativas en la producción en serie (Li y Huang, 2014).

Ahmad, Choi, y Park (2015) en su investigación "A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties" analizan el uso y aplicación de fibras naturales como el jute, el bambú, abacá, etc., como refuerzo para materiales compuestos utilizados en la fabricación de autopartes de vehículos, a partir de un análisis de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas que favorezcan su aplicación en el sector manufacturero automotriz. Este estudio favorece a la utilización de fibras naturales

como reemplazo de las fibras sintéticas presentes en el vehículo y además el beneficio de reducción de peso del automóvil y su bajo costo (Ahmad, Choi, y Park ,2015).

**Planteamiento del problema**

La industria automotriz tiene un rol fundamental en el desarrollo de la economía de cualquier país y nuestro país no es la excepción, ya que el sector automotriz contribuye cada año en la generación de más de 6000 empleos en forma directa y más de 5000 indirectos, además hay que resaltar que en los últimos cuatro años los ingresos en exportaciones ha sido más de 654 millones de dólares, de los cuales 340 millones corresponden a autopartes, como también beneficia a otras industrias como la metalmecánica, caucho, plásticos, textil y vidrios que son sectores claves para la fabricación de vehículos CINAE (2017).

Hay que tomar en cuenta que en los periodos 2015 – 2016 la industria automotriz en el Ecuador tuvo un gran descenso tomando en cuenta las ventas anules de vehículos, sin embargo al cerrar el año 2017 se obtuvo un valor de 40138 unidades de vehículos ensamblados localmente y 64939 unidades importadas lo que da un valor total de 105077 de vehículos vendidos en este periodo lo que representó un incremento positivo y alentador para el sector automotriz comparado a los años anteriores AEADE (2017).

En la figura 1 se puede observar en forma gráfica el aumento positivo que ha tenido el sector automotriz en nuestro país en el año 2017.

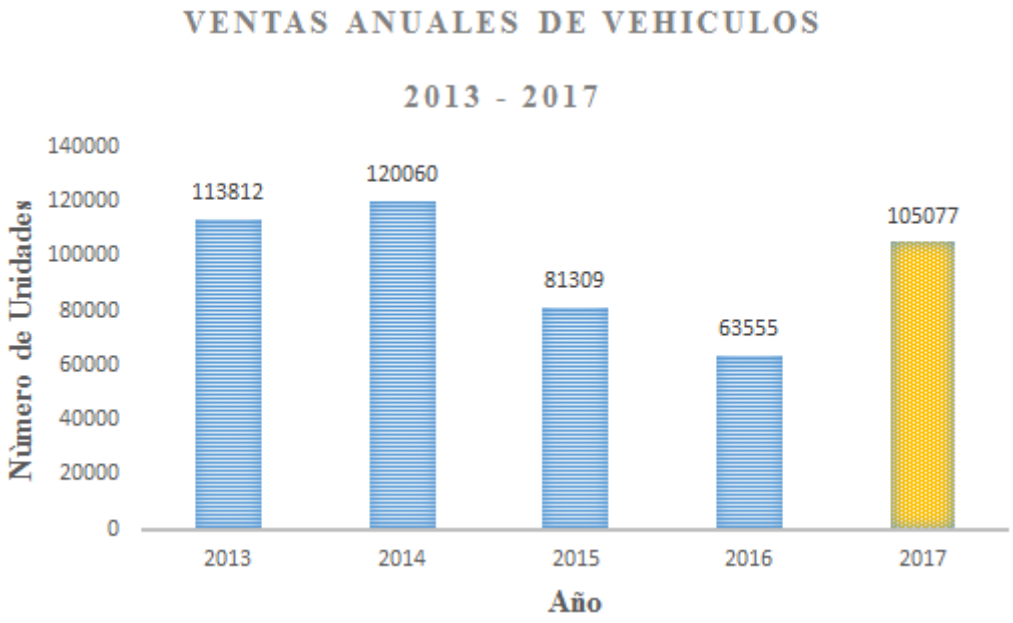



*Figura 1.* Ventas anuales de vehículos en el Ecuador en los años 2013 – 2017; *(Anuario AEADE 2017)*

Según las directrices establecidas en el plan nacional del buen vivir en el cual se focaliza en la creación de nuevas industrias que prioricen la producción nacional que a su vez posean una elevada productividad, sean sostenibles, sustentables y diversos, lo que conllevara a largo plazo a la sustitución de importaciones por parte de los diferentes sectores industriales de esta manera permitirá el fortalecimiento de la economía de nuestro país (Plan nacional del buen vivir 2013 - 2017).

En nuestro país las políticas adoptadas para impulsar el desarrollo e innovación industrial en el área automotriz, textil, agrícola, etc., son el apoyar y viabilizar la creación de emprendimientos productivos, con la finalidad de reducir la dependencia de la exportación de materias primas; de esta manera las pequeñas y medianas empresas contribuyen al mejoramiento económico del país al fabricar bienes que contengan un alto valor agregado MIPRO (2017). Por tal razón, mediante el desarrollo de la presente investigación se busca proponer la caracterización de un material compuesto reforzado con fibras naturales existentes en nuestro país y combinarlas con nuevas técnicas de fabricación aditiva, que permitan promover la manufactura de rejillas de aire acondicionado de vehículos que son un

elemento primordial para el sistema de calefacción y aire acondicionado de los automotores, que a su vez están presentes en el tablero de instrumentos en vehículos livianos y pesados; con lo cual se cubre la demanda interna del sector automotriz de este tipo de autopartes realizando una fabricación o recambio del elemento en menor tiempo y utilizando materiales menos contaminantes con la naturaleza.

Tomando en cuenta lo antes mencionado se ve la necesidad de fabricar rejillas de aire acondicionado de vehículos con materiales compuestos de esta manera se contribuye con la proyección de empresas autopartistas en nuestro país, que trae consigo algunas ventajas como la reducción de tiempos de fabricación o recambio de las rejillas de aire acondicionado ya que estos elementos presentan un alto grado de escases como elementos individuales de los tableros de instrumentos de los diferentes tipos de vehículos livianos y pesados, disminuir el peso del vehículo, lo que con lleva a la reducción de consumo de combustible y por ende a la reducción de emisiones contaminantes, de esta manera se da un valor agregado a los productos fabricados en nuestro país y que a la vez contribuyan con el cuidado y mejoramiento del medio ambiente.

**Justificación**

En nuestro país la industria automotriz está aportando significativamente en el desarrollo económico nacional, el sector automotriz se encuentra conformado por 4 empresas ensambladoras, 92 empresas que constan como firmas autopartistas, 1271 empresas de venta de vehículos nuevos y usados, 81 empresas de fabricación de carrocerías y 3126 establecimientos de comercio automotor (mantenimiento, reparación, venta de partes, etc.), con lo cual es un eje fundamental en la generación de empleos (Sector Automotor en cifras boletín 20 – AEADE 2018).

Las estrategias adoptadas por el ministerio de industrias y productividad (MIPRO) y los representantes del sector automotriz están orientadas a incrementar el porcentaje de contenido local del 16% en 18 meses y al 19 % en tres años en toda la cadena de producción del sector automotriz, lo cual permitirá la proyección de empresas que se dediquen a la fabricación de autopartes que contribuyan al mejoramiento de la economía del país.

Berchon y Luyt (2016) afirman que la tecnología de impresión 3D, trae consigo grandes 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 (Berchon y Luyt, 2016).

Roshdestwensky et al. (2013) afirman que los materiales compuestos han tenido su progreso, desarrollo y mayor uso por parte de los sectores industriales, en el afán de mejorar las propiedades de los materiales tradicionales con los cuales se ha venido fabricando partes o maquinas a lo largo del tiempo, de esta manera han logrado obtener mejoras considerables en propiedades térmicas, mecánicas, químicas, etc.; por tal razón estos nuevos materiales se afirman y consolidan en el área aeroespacial, automotriz, naval, etc. (Roshdestwensky et al., 2013)

La fabricación de materiales compuestos que poseen fibras naturales como refuerzo, combinado con nuevas técnicas de manufactura aditiva en nuestro país, es un sector que aún no ha tenido un impacto industrial en el área automotriz.

A nivel internacional el uso de las fibras naturales va ganando mercado y aplicación dentro de las diferentes industrias, tomando en cuenta las características de sostenibilidad y la reducción de la contaminación ambiental debido a su uso, esto genera el interés de promover la innovación en procesos de cultivo, uso y comercialización de fibras naturales CICO

(2009). El Ecuador está posicionado como uno de los países productores de fibra de abacà a nivel mundial, según los datos obtenidos hasta el año 2007 Ecuador produjo cerca de 10000 toneladas de fibra de abacà, por detrás de Filipinas que produjo 60000 toneladas que es el principal productor a nivel mundial FAO (2009).

El Ecuador posee una gran diversidad de plantas de las cuales se pueden extraer fibras naturales como materia prima para la elaboración de nuevos productos. Para esto es necesario tomar en cuenta que en nuestro país existen alrededor de 25 mil especies de plantas vasculares, de las cuales 25 tipos de plantas son comúnmente utilizadas para extraer las fibras, algunos ejemplos son la cabuya, totora, abacà, etc., por tal razón el uso de fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos es muy alentador para nuestro país Guerrero et al., (2011).

En el Ecuador se fabrican algunas piezas y partes que forman parte del componente local en el ensamblaje de vehículos, a continuación se mencionan algunos de ellos: asientos, alfombras, baterías, amortiguadores, llantas, ballestas, sistemas de escape CINAE (2018).

En los estudios realizados por Ruzic (2011) se afirma que el ambiente térmico dentro del automóvil y la calidad del aire influyen en forma directa en la confortabilidad, salud y rendimiento del conductor como de los ocupantes del vehículo, por tal motivo todos los elementos que forman parte del sistema de calefacción y aire acondicionado deben estar en perfecto estado, más aun los elementos en los cuales se da la salida de aire al habitáculo (rejillas de ventilación) para garantizar que se establezca un ambiente térmico homogéneo lo cual permita establecer condiciones de confort a ocupantes en todo el vehículo (Ruzic, 2011).

Tomando en cuenta lo antes expuesto el objetivo principal en la presente investigación es caracterizar un material compuesto con matriz de resina fotopolimérica reforzada con fibras naturales de abacá y cabuya mediante el proceso de fabricación aditiva PolyJet para la innovación en la manufactura de autopartes, tomando en cuenta como elemento modelo las

rejillas de aire acondicionado del Chevrolet Vitara modelo tres puertas del año 1997 con la finalidad de realizar la restitución rápida de las rejillas de ventilación fracturadas y garantizar un reparto uniforme del aire dentro del automóvil , por tal razón, este proyecto se busca evaluar la posibilidad de generar un material compuesto de matriz fotopolimérica reforzado con fibra natural, que al ser combinado con las nuevas técnicas de fabricación aditiva, permitirá la proyección de empresas dedicadas a la manufactura de autopartes que tengan como base el uso de materiales compuestos, lo que conllevaría a un avance tecnológico de producción industrial de autopartes en el sector automotriz que sea más amigable con el medio ambiente, basándonos en una metodología idónea que admita:

- Analizar las propiedades físicas y mecánicas que presentan los materiales bases que forman parte del material compuesto.
- Determinar la orientación y la cantidad adecuada de las fibras naturales a utilizar como material de refuerzo.
- Realizar ensayos de flexión de probetas bajo normas ASTM respectivamente para los diferentes materiales compuestos obtenidas mediante fabricación aditiva PolyJet.
- Obtener valores de las propiedades mecánicas a flexión del material compuesto reforzado con los dos tipos de fibras naturales utilizadas y realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos.
- Comparar los materiales compuestos, el material matriz y el material original de las rejillas de aire acondicionado mediante simulación estructural por medio del software NX 10.

**Estado del arte**

Existen algunos estudios acerca del uso de materiales compuestos para reemplazar el uso de materiales convencionales tales como aceros y plásticos en la fabricación de componentes de los vehículos, con la finalidad de reducir peso del vehículo y contribuir al cuidado del

medio ambiente. Uno de ellos es el estudio realizado por Faris et al., (2013) en el cual realiza un estudio de Compuestos de polímeros reforzados con fibra natural en aplicaciones industriales: viabilidad de fibras de palma datilera para la industria automotriz sostenible en el cual resaltan una aplicación que realizo Daimler AG en la cual logró una mejora en los paneles de las puertas de la Clase E de Mercedes-Benz en cuento a las propiedades mecánicas que presentaba el material original, esto se logró al utilizar resina epóxica como material matriz y en la cual iban incrustadas fibras de lino / sisal, y además se logró una reducción del 20% del peso original de las puertas (Faris et al., 2013).

Hay que resaltar el estudio realizado por Limaye et al., (2012) en cual se realizó un análisis computacional CFD que involucra el estudio de dos tipos de rejillas de ventilación como son los de tipo estáticos y dinámicos existentes en los vehículos, dando como resultado un incremento en la mejora del ambiente térmico en la cabina y los ocupantes por parte del sistema que posee rejillas de ventilación dinámicas; también resalta que la dirección del flujo de aire presente dentro del vehículo está influenciada principalmente por el número de salidas de aire, la forma y las posiciones de las rejillas de aire dentro de la cabina del automóvil (Limaye et al., 2012).

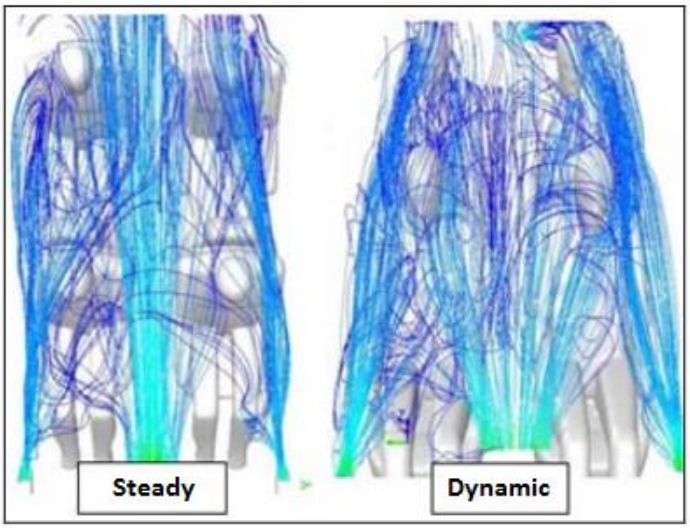



*Figura 2.* Análisis CFD de los dos tipos de rejillas de ventilación (Estable y dinámica); *(Limaye et al., 2012)*

En los estudios realizados por Limaye et al., (2012) afirma que “las paletas de ventilación estándar se ajustan manualmente hacia arriba / abajo, derecha / izquierda por los pasajeros para dirigir el flujo de aire” (p. 42). Por lo que esto tipo de sistemas constantemente están sujetos a una fuerza aplicada para satisfacer las necesidades de flujo de aire para el confort dentro del vehículo por lo que tiene el riesgo de fractura o deterioro de las rejillas de aire acondicionado, tal como se muestra en la figura 3.

*Figura 3.* Aplicación de la fuerza de posicionamiento en las rejillas de ventilación del sistema Aire acondicionado; *(https://blog.ocasionplus.com/cinco-errores-evitar-aire-acondicionado/)*

En los estudios realizados por Andresen et al., (2012) en el cual se investigo acerca de piezas de automóviles que están siendo fabricadas y usadas en diferentes tipos de vehículos que tienen una gran proporción de fibras naturales como materia prima para su fabricación. También hay que resaltar el uso de este tipo de material en autopartes automotrices como panel de instrumentos, pisos posteriores, asientos, etc., y posibles elementos potenciales de aplicación de biomateriales como ventiladores, unidades de control del tablero y rejillas de ventilación entre otros (Andresen et al., (2012).

Otro estudio importante es el realizado por Diharjo et al., (2013) en el cual estudia la resistencia a la flexión en compuestos híbridos de Vidrio / Carbono-Bisfenol para el

desarrollo de la Carrocería de Vehículo Eléctrico en el cual resalta las características de los materiales compuestos como ser livianos, presentar buena resistencia y bajo costo de fabricación con la finalidad de sustituir al acero que constituye un material comúnmente usado en las estructuras de los vehículos, los resultados obtenidos en su estudio reflejan un aumento en la resistencia a la flexión al existir la presencia de las fibras como refuerzo pero por lo contrario se presenta una disminución del módulo de flexión del material compuesto (Diharjo et al., 2013).

**Fabricación Aditiva**

> La fabricación de aditivos es el proceso de creación de un objeto físico basado en su representación virtual mediante la adición de material capa a capa. Su principal ventaja con respecto a los métodos de fabricación tradicionales es que prácticamente cualquier geometría puede ser construida, ofreciendo una complejidad geométrica casi ilimitada y sin restricciones. (Cazón, Morer y Matey, 2013, p. 1664)

Este tipo tecnología se ha desarrollado en los últimos años como un nuevo método para la fabricación de elementos en varios campos industriales a nivel mundial. “El Comité Técnico ASTM F42 define la fabricación de aditiva (AM) como el proceso de unir materiales para fabricar objetos a partir de datos de modelos tridimensionales (3D) generalmente capas sobre capas, en oposición a metodologías de fabricación substractivas” (Guo y Leu, 2013, p.215).

> Hasta hace poco, cinco eran las tecnicas principales que se empleaban en la fabricacion de objetos, componentes y formas a partir de un material dado. Los diferentes metodos de procesamiento de materiales se muestran a continuacion:

- Fundición: Molde desechable y molde permanente.
- Formado y conformado: Laminación, forja, extrusión, estirado, metalurgia de polvos y moldeo.

- Maquinado: Torneado, taladrado, fresado, esmerilado, etc.
- Unión: Soldadura sin aporte y con aporte, soldadura blanda, etc.
- Acabado: Asentado, pulido, bruñido, tratamiento superficial, recubrimiento, etc.

(Kalpakjian y Schmid, 2002, p.18-19)

**Tipos de fabricación aditiva.** La fabricación aditiva trae consigo la utilización de diferentes de técnicas para el desarrollo y fabricación de elementos, tomando en cuenta la utilización de materiales bases adecuados que se utilizan en los diferentes métodos de impresión 3D. A continuación se exponen las principales técnicas de impresión 3D que se han desarrollado hasta la actualidad:

- La estereolitografía (o SLA): Emplea un rayo láser ultravioleta que permite solidificar sucesivamente las capas de fotopolímeros líquidos.
- Proceso PolyJet: El objeto se fabrica inyectando fotopolímeros sobre una superficie, capa por capa, hasta alcanzar el resultado final. Cada vez que una capa ha sido depositada se aplica un tratamiento ultravioleta, que le permite que la sustancia se endurezca inmediatamente.
- Sinterizacion selectiva por láser (o SLS): Por medio de un láser muy potente logra fusionar minúsculas partículas de polvo de plástico, cerámica, vidrio y metal. El material más común es la poliamida.
- Fusión por rayos de electrones (o EBM): Parte de un polvo de metal que un láser de electrones funde dentro de una cámara de vacío a una temperatura de entre 700 a 100 $^{o}$C.
- Impresión Tridimensional (o 3DP): Consiste en una plataforma que va descendiendo sucesivamente y sobre la cual un rodillo extiende una finísima capa de polvo, a continuación, un cabezal de impresión deposita unas minúsculas gotas de pegamento que encolan el material en polvo.

- Modelado por deposición fundida (o FDM): Consiste en depositar sucesivamente un filamento de plástico o metal fundido en capas muy finas.
- Laminado por depósito selectivo (SDL o LOM): Consiste en el corte progresivo de hojas de papel, que son encoladas unas con otras con la ayuda de una sustancia adhesiva depositada de manera selectiva.

(Berchon y Luyt, 2016, pp.18-34)

Bonada, Muguruza y Ramis (2017) afirman que los procesos de fabricación aditiva (AM) pueden construir partes o elementos en 3D y agregar material capa por capa de acuerdo a cada tipo de fabricación aditiva, también hay que tomar en cuenta una característica de la impresión 3D con respecto a los otros procesos de fabricación, la cual permite fabricar geometrías complejas sin usar herramientas o accesorios específicos (Bonada, Muguruza y Ramis, 2017).

En la figura 4 se puede observar el proceso de fabricación de un elemento mediante la fabricación aditiva.

*Figura 4.* Proceso de impresión 3D – Fabricación Aditiva; *(Berchon & Luyt, 2016)*

**Materiales para la fabricación aditiva.** Los materiales utilizados para la fabricación de elementos y partes mediante el método de impresión 3D, también han tenido su desarrollo acorde al progreso de las diferentes técnicas de fabricación aditiva, acorde a sus características y aplicaciones. En la tabla 1 se muestran los principales materiales utilizados en la fabricación aditiva para cada técnica a utilizar y también su técnica de creación de capa.

**Tabla 1.**

*Principales materiales para la fabricación aditiva*

| Estado del material de partida | Técnica de fabricación aditiva | Técnica de creación de capa | Material típico |
|---|---|---|---|
| Liquido | SLA | Escaneado láser / Proyección de luz | Resina curable por UV, Suspensión cerámica |
| | PolyJet | Inyecta pequeñas gotas de resina curable ultravioleta | Fotopolímero a base de acrílico |
| Filamento/ Pasta | FDM | Extrusión continua y deposición | Termoplásticos, ceras |
| Polvo | SLS | Escaneado láser | Termoplásticos, ceras, polvo metálico, polvo de cerámica |
| | EBM | Digitalización de haz de electrones | Metal |
| | 3DP | Impresión de encuadernación bajo demanda | Polímero, metal, cerámica, otros polvos |
| Hoja sólida | LOM | Alimentación y encuadernación de hojas con adhesivos | Papel, plástico, metal |

***Nota.*** Principales materiales utilizados en las diferentes técnicas de fabricación aditiva. SLA = estereolitografía; MJM = Modelado MultiJet; FDM = Modelado por deposición fundida; SLS = Sinterizacion selectiva por láser; EBM = Fusión por rayos de electrones; 3DP = Impresión tridimensional; LOM = Laminado por depósito selectivo; UV = Rayos ultra violeta. Adaptado de "Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping," por Kruth, J., Leu, M. y Nakagawa, T, 1998, *CIRP Annals*, 47(2), p. 526, y "PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties," por Cazón, A., Morer, P., y Matey, L, 2014, *Engineering Manufacture*, 228, p. 1664.

**Aplicaciones de la fabricación aditiva.** La fabricación aditiva como un proceso de fabricación de elementos, herramientas y prototipos abarca algunas industrias a nivel mundial. "En los países desarrollados se ha aplicado en la industria aeroespacial, fabricación de automóviles, equipos médicos, electrodomésticos y otras industrias, la proporción de la aplicación en la fabricación de automóviles es la más grande, alrededor del 25%" (Li y Huang, 2014, p.106).

En la figura 5 y 6 se muestran algunas aplicaciones utilizando las diferentes técnicas de fabricación aditiva en un campo industrial específico.

- Aeroespacial

*Figura 5.* Pala de turbina con canales de refrigeración internos producidos por sinterización láser de metal; *(Guo & Leu, 2013)*

- Automotriz

*Figura 6.* Montaje final de un colector de admisión fabricado por modelado por deposición fundida*; (Guo & Leu, 2013)*

**Proceso PolyJet**

Es una técnica de fabricación aditiva de elementos, que en la actualidad tiene su aplicación en diferentes sectores industriales, debido a su principio de generación de objetos dentro de la impresión 3D.

> Implementada en 1999 por la compañía Objet, la tecnología PolyJet también emplea la técnica de la fotopolimerización, pero de una manera distinta a la SLA y la DPL. Aun así el programa de la maquina divide el modelado 3D en capas muy finas y planifica las junturas que sustentan el objeto, necesarias para el buen desarrollo de la impresión. (Berchon y Luyt, 2016, p.22)

La tecnología PolyJet es un método de impresión 3D que ofrece un acabado superficial de mucha calidad comparado con los otros métodos de manufactura aditiva, además presenta ventajas como la facilidad de fabricar elementos con geometrías complejas sin tener dificultades como también maneja una gran variedad de materiales para las diferentes industrias y aplicaciones solicitadas Stratasys (2017).

> El usuario elimina fácilmente el material de soporte a mano, con agua o en un baño de solución. Los modelos y piezas están listos para su uso y manipulación al sacarlos de la impresora 3D, sin necesidad de endurecimiento posterior. (Stratasys, 2017)

En la figura 7 se muestra el proceso de funcionamiento de la tecnología PolyJet para la fabricación de objetos.

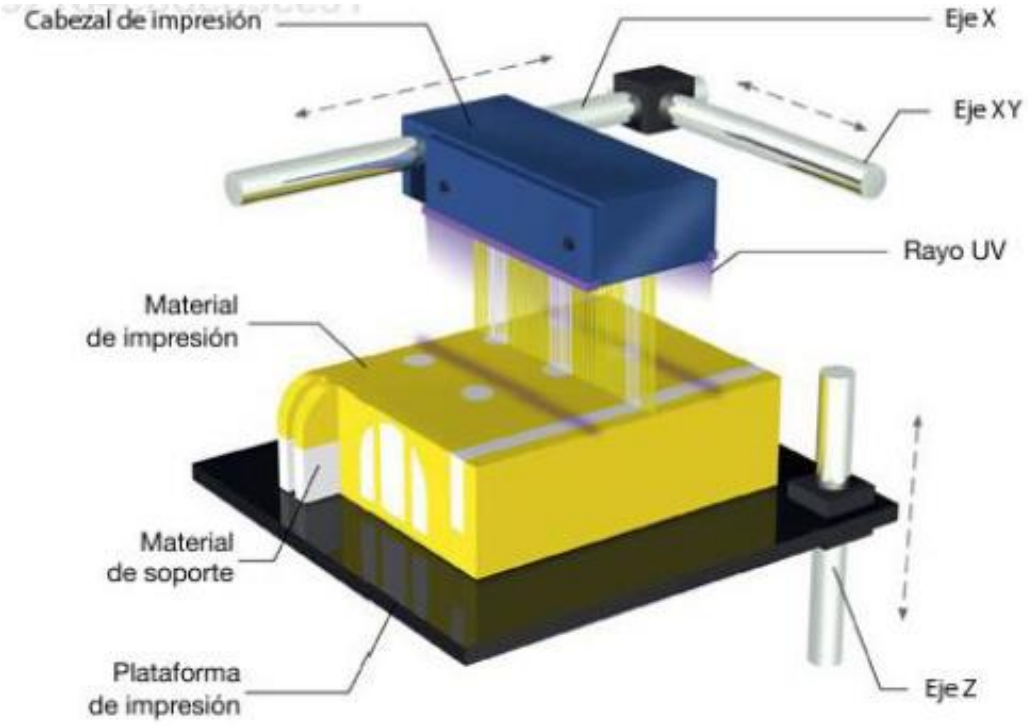



*Figura 7.* Proceso de funcionamiento de tecnología PolyJet; *(Berchon & Luyt, 2016)*

**Ventajas de la impresión 3D PolyJet.** La tecnología PolyJet ofrece un nivel excepcional de detalle, suavidad de la superficie y precisión.

- Cree prototipos suaves y detallados que transmiten la estética del producto final.
- Genere moldes, guías, fijaciones y otras herramientas de fabricación precisas.
- Consiga formas complejas, detalles complicados y características delicadas.
- Incorpore la mayor variedad de colores y materiales a un solo modelo para lograr una eficacia insuperable.

(Stratasys, 2017)

**Materiales compuestos**

> Desde la aparición de los polímeros hasta la fecha, son múltiples las aplicaciones y las facilidades para transformarlo que lo han hecho atractivo para ser utilizados en campos donde antes solo se usaba metales, maderas, o cerámicos. El mejoramiento de los polímeros con refuerzos de fibras vegetales, han hecho que se produzcan los materiales reforzados (*composites* en inglés), lo cual permite diseñar el material a usar. (Córdoba, Mera, Martínez y Rodríguez, 2010, p. 418)

> En años recientes, el uso de fibras naturales en diversas áreas ha surgido con gran fuerza. Entre las principales razones se tiene la disponibilidad, diversidad y revocabilidad de las fibras, así como el bajo consumo energético en su fabricación, los costos competitivos y su baja densidad. (Quesada, Alvarado, Sibaja y Vega, 2005, p. 158)

"Se entiende por material compuesto al formado por dos o más fases, no miscibles y de diferente estructura, cuyas cualidades individuales se combinan dando lugar a un material heterogéneo con propiedades estructurales o funcionales globales mejoradas" (Morales, 2008, p. 35).

**Partes de un material compuesto.** Este tipo de materiales presentan una estructura que se detalla a continuación.

"Un material compuesto es aquel formado por una matriz (metálica, cerámica, o polimérica) y un reforzante (fibras, partículas, polvos o tejidos)" (Fajardo, 2015, p. 1).

En la figura 8 se puede apreciar los componentes que estructuran un composite (material compuesto).

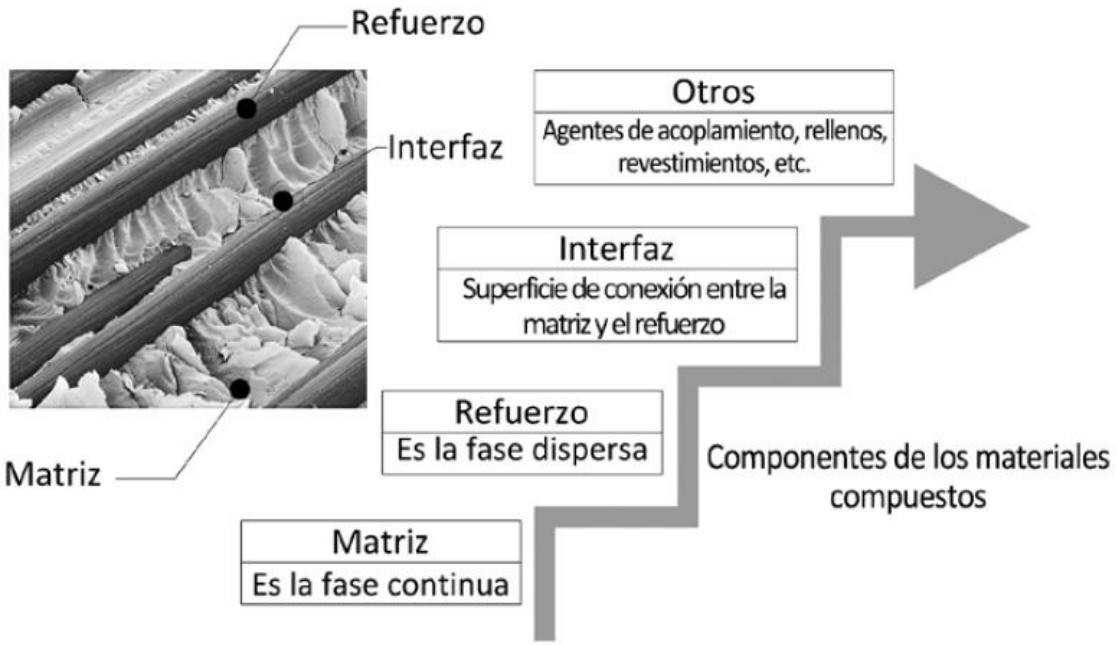



*Figura 8.* Componentes de un material compuesto; *(Guerrero et al., 2011)*

***Matriz***. Es uno de los elementos principales de los materiales compuestos y sus principales funciones son: "fijación de las fibras en el ordenamiento geométrico deseado, trasmisión de los esfuerzos a las fibras, protección de las fibras frente a los esfuerzos de compresión y protección a las fibras de los medios externos" (Morales, 2008, 36).

En la tabla 2 se indican los tipos de matrices utilizados en materiales compuestos.

**Tabla 2.**

*Tipos de matrices utilizados en materiales compuestos.*

| Tipo de Matriz | Materiales utilizados | Características | Tipo de refuerzo | Aplicaciones |
|---|---|---|---|---|
| *Matrices Metálicas* | Aluminio<br>Magnesio<br>Cobre<br>Níquel | Resistencia a altas temperaturas, alta resistencia mecánica, elevada dureza y rigidez. | Partículas<br>Whiskers<br>Fibras | Industrias Aeroespacial y Automotriz |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *Matrices Cerámicas* | Cerámicos | Resistencia a temperaturas elevadas, menor densidad que las matrices metálicas. | Fibras | Aeroespacial y Automotriz |
| *Matrices Poliméricas* | Termoplásticos Termoestables Elastómeros | Baja densidad, facilidad de conformado, costos relativamente bajos. | Fibras | Automotriz |

***Nota.*** Principales tipos de matrices utilizados en materiales compuestos y sus características fundamentales de cada una de ellas. Adaptado de "Nuevos Materiales – Aplicaciones estructurales e industriales," por Guerrero et al, 2011, p. 52-54.

***Refuerzo.*** "El segundo componente de un material compuesto es el refuerzo. Dicho componente es el encargado de suministrarle mayor resistencia y un buen comportamiento mecánico al material" (Morales, 2008, p.37).

> Los factores básicos en el refuerzo son la resistencia, la dureza y la relación forma de la fibra, la compatibilidad con la matriz (que confiere una buena adhesión en la interface fibra/matriz) y la concentración de la fibra en el compuesto final. (Salvador, Amigó, Nuez, Sahuquillo, Llorens y Martí, 2008, p.1)

A continuación se describe los tipos de refuerzos utilizados en materiales compuestos.

> *Partículas.* Las partículas como material de refuerzo permiten hacer dos tipos de compuestos: los dispersoides y los particulados. Los dispersoides son materiales endurecidos por dispersión. … Los particulados contienen grandes cantidades de partículas gruesas y son diseñados para obtener propiedades poco usuales. Ciertas propiedades de un compuesto con partículas dependen solo de sus constituyentes. (Páez, 2007, p. 19)

> *Fibras.* Las fibras, así como sus productos como hilos, cordones y cintas, son ampliamente usadas como materiales de refuerzo en los compuestos en ingeniería. Por lo general este tipo de compuestos consiguen mayor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor

> relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles en una matriz más blanda y dúctil. … Esta fibra de refuerzo puede ser de origen sintético o natural. La mayor parte de compuestos producidos en la actualidad son reforzados con fibras sintéticas tales como vidrio, carbón y asbesto. Sin embargo, preocupaciones ambientales y los precios altos del petróleo han llevado a intensificar las investigaciones referentes al uso de las fibras naturales como refuerzo. (Páez, 2007, p.20)

"Dentro de las fibras naturales, se utilizan como elementos de refuerzo en mayor o menor acierto, una gran cantidad de las mismas como yute, cáñamo, sisal, plátano, algodón, lino, kenaf, abacá, coco, bambú y otras" (Amigó, Salvador, Llorens, Martí y Sahuquillo, 2008, p.2).

En la tabla 3 se menciona los principales tipos de fibras utilizados en materiales compuestos.

**Tabla 3.**

*Tipos de fibras utilizados en materiales compuestos.*

| Tipo de fibra | Características | Ventajas |
|---|---|---|
| *Whiskers* | Son monocristales muy delgados que tienen una relación longitud/diámetro muy grande. | Altas resistencias |
| *Fibras* | Son materiales policristalinos o amorfos, tienen diámetros pequeños y una gran longitud. Los materiales de las fibras son normalmente polímeros o cerámicos y también fibras naturales como abacá y cabuya. | Reducción de costo de manofactura y su menor impacto ambiental. |
| *Alambres* | Tienen diámetros relativamente grandes. Típicamente estos materiales incluyen al acero, molibdeno y tungsteno. | Propiedades finales del compuesto excepcionales |

***Nota.*** Principales tipos de fibras utilizados en materiales compuestos. Adaptado de "Nuevos Materiales – Aplicaciones estructurales e industriales," por Guerrero et al, 2011, p. 56.

***Interfaz.*** "Superficie existente entre la matriz y el refuerzo. Cuando del material esta reforzado con fibras, el papel de la interfaz es todavía más importante, ya que de la unión

entre los constituyentes dependerán las propiedades mecánicas del compuesto" (Guerrero et al, 2011, p.51 - 52).

> En general a grandes deformaciones y cuando no existe una buena adhesión en la interface, la incorporación de fibras cortas a un polímero produce la aparición de defectos en la interface. Estos se ponen de manifiesto en una disminución de la resistencia debido a la concentración de tensiones creadas por solapamiento de fibras y los extremos de las mismas. ... En todo caso, la deformación del material a rotura será controlada por la resistencia del propio material y por la adhesión fibra-matriz, sirviendo la regla de las mezclas como guía para conocer el efecto de las fibras en las propiedades finales. (Amigó, Salvador, Llorens, Martí y Sahuquillo, 2008, p.1)

**Clasificación de los materiales compuestos.** Guerrero (2011) muestra una clasificación de materiales compuestos en función de los tipos de refuerzos utilizados tales como: reforzados con partículas, fibras y elementos estructurales. En la figura 9 se indica esta clasificación.

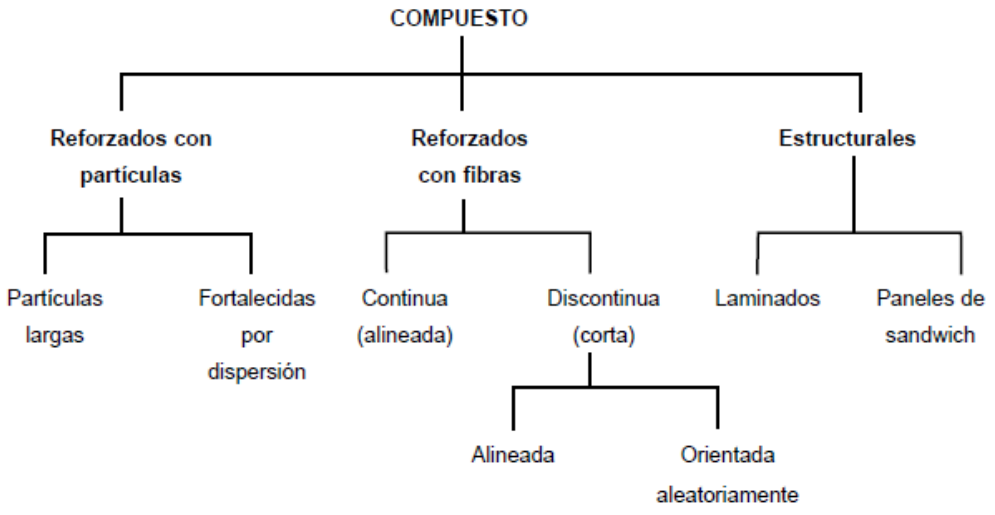



*Figura 9.* Clasificación de materiales compuestos en función de los tipos de refuerzos**;** ***(Guerrero et al, 2011)***

**Características de los materiales compuestos.** Callister (2007) afirma que las propiedades finales de los materiales compuestos dependen de las características de los dos componentes principales como son: la matriz y el refuerzo, tomando en cuenta en este último la forma, tamaño, distribución y orientación.

En la figura 10 se muestran en forma gráfica las características y configuraciones del refuerzo antes mencionados en un material compuesto.

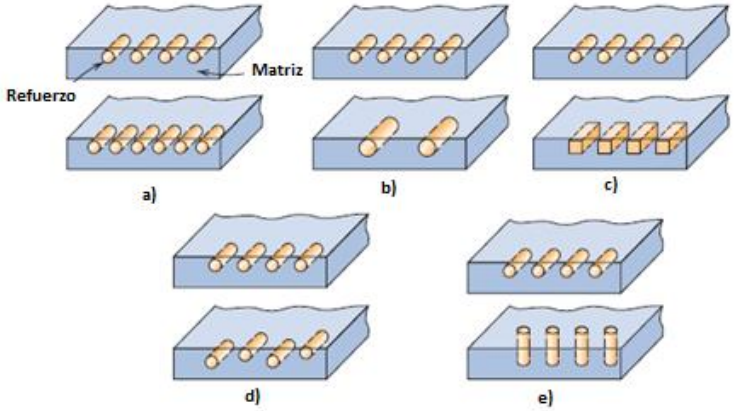



*Figura 10.* Distintas configuraciones y características del refuerzo en un material compuesto tales como: a) concentración, b) tamaño, c) forma, d) distribución y e) orientación*; (Callister, 2007)*

***Características de materiales compuestos reforzados con fibras.*** Callister (2007) afirma que una de las principales combinaciones de materiales compuestos son aquellos que son reforzados con fibras, ya que presentan excelentes propiedades mecánicas como resistencia a la tracción y modulo especifico elevados una vez fabricados, partiendo de elementos bases de baja densidad tanto en la matriz y la fibra.

*Influencia de la orientación de la fibra.* Guerrero et al. (2011) afirman que la orientación, cantidad y distribución del refuerzo del material compuesto influyen directamente en las propiedades mecánicas finales del compuesto.

En la figura 11 se muestran las orientaciones posibles del refuerzo que pueden darse en un material compuesto reforzado con fibras como son a) fibras continuas y alineadas, b) fibras discontinuas y alineadas, y c) fibras discontinuas orientadas aleatoriamente.

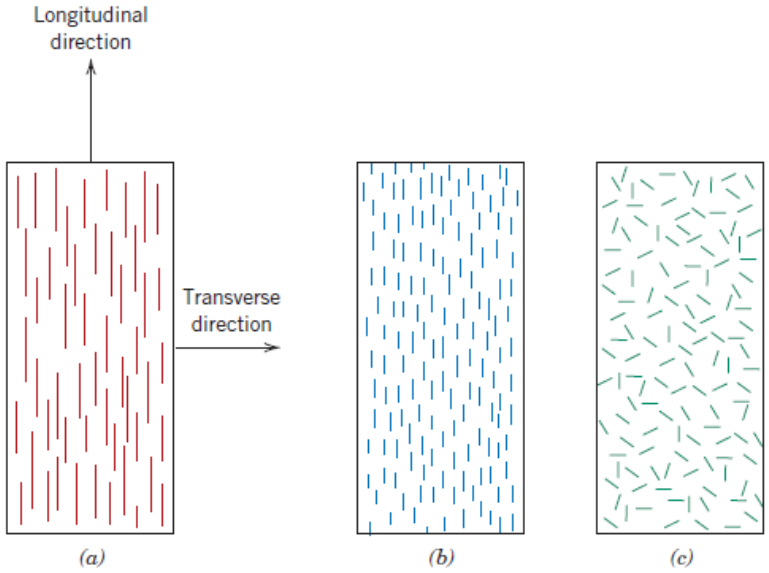



*Figura 11*. Orientaciones posibles del refuerzo en un material compuesto tales como: a) fibras continuas y alineadas, b) fibras discontinuas y alineadas, y c) fibras discontinuas orientadas aleatoriamente; *(Callister, 2007)*

> Los arreglos unidireccionales con fibras largas e incluso continuas producen propiedades anisotrópicas, con resistencia y rigidez paralelas a las fibras particularmente buenas. Estas fibras se denominan frecuentemente como capas de $0^0$, indicando que todas las fibras están alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado. (Askeland, 1998, p. 522)

En la figura 12 se indica el efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E.

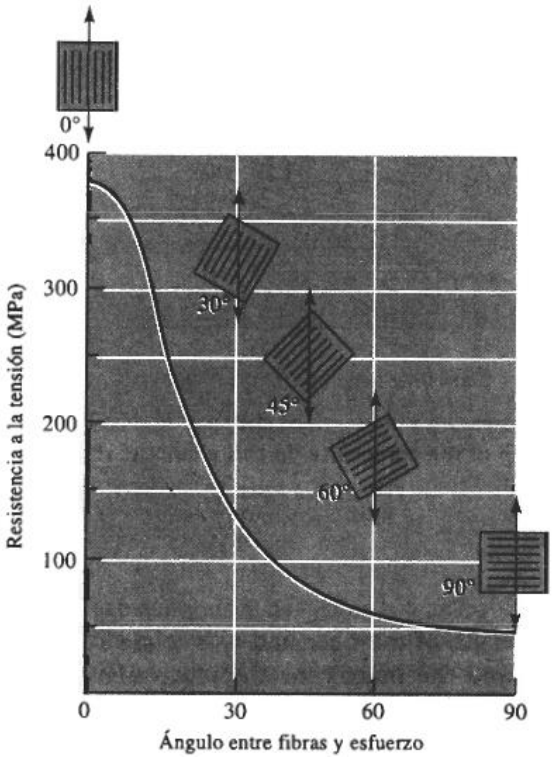



*Figura 12.* Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E; *(Askeland, 1998)*

*Influencia de la cantidad de la fibra.* En un material compuesto reforzado con fibras, la fracción volumétrica de fibras que forman parte del compuesto es importante, ya que aportan a las propiedades finales del compuesto. “La fracción máxima de volumen de fibras es aproximadamente el 80 por ciento, más allá de esta cantidad las fibras ya no quedan totalmente rodeadas por la matriz” (Askeland, 1998, p. 522).

**Propiedades mecánicas de las fibras naturales.** En los estudios realizados por Fajardo (2015) se muestran algunas propiedades mecánicas de diferentes fibras naturales usadas como refuerzo en compuestos termoplásticos como se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Propiedades mecánicas de diferentes fibras naturales como refuerzo en compuestos termoplásticos.*

| Fibra | Resistencia a la tracción (MPa) | Módulo de Young (GPa) | Modulo Especifico |
|---|---|---|---|
| Yute | 187 - 733 | 10 - 30 | 7 - 21 |
| Banano | 529 - 914 | 7 - 32 | 5 - 24 |
| Sisal | 507 - 855 | 9.4 - 28 | 7 - 19 |
| Henequén | 430 - 580 | 10 - 16 | 7 - 11 |
| Piña | 170 - 1627 | 62 - 182 | 4 - 53 |

***Nota.*** Propiedades mecánicas de diferentes fibras naturales y sintéticas utilizadas en materiales compuestos. MPa= Megapascales, GPa = Gigapaspales, ($g/cm^3$) = unidad de medida de densidad del material y (%) = porcentaje de elongación a la fractura del material. Adaptado de "Determinación del estado de orientación de fibras cortas, mediante procesamiento digital de imágenes, en un compuesto termoplástico polipropileno/bambú moldeado por inyección," por Fajardo, 2015, p. 4.

**Aplicación de materiales compuestos.** En los últimos años la utilización de materiales compuestos reforzados con fibras, se ha incrementado en las diferentes industrias a nivel mundial. "Es importante indicar que dentro de la utilización de materiales compuestos, los polímeros ocupan un sitial importante. Tanto polímeros termoplásticos como termoestables son muy usados con refuerzos en forma de fibras" (Guerrero et al, 2011, p.48).

En la figura 13 se indica en forma gráfica las diferentes industrias en las cuales se ha realizado la aplicación de materiales compuestos.

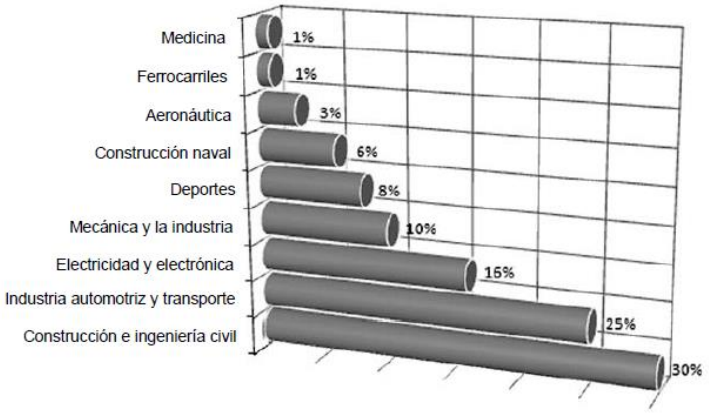



*Figura 13.* Industrias de aplicación de materiales compuestos; *(Guerrero et al., 2011)*

# MÉTODO

## Tipo de Estudio

El presente proyecto de investigación se basa en un enfoque cuantitativo, el mismo que inicia con una investigación exploratoria acerca de la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras de abacá y cabuya con tecnologías de manufactura aditiva, para luego aplicar una investigación descriptiva con la cual se busca evaluar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos obtenidos.

## Modalidad de investigación

Para el desarrollo del presente estudio se aplicara un diseño de investigación tipo experimental el cual se fundamenta en la utilización de fibras de abacá y cabuya como refuerzos de materiales compuestos elaborados mediante manufactura aditiva, con la finalidad de evaluar el tipo de fibra refuerzo que presente las mejores propiedades mecánicas, tomando en cuenta una proporción volumétrica especifica de refuerzo, los cuales serán sometidos a ensayos de flexión.

## Metodología

El proceso de obtención de un material compuesto mediante tecnologías de fabricación aditiva que presente las mejores propiedades mecánicas en función de la fibra refuerzo utilizada de abacá y cabuya respectivamente, con una proporción volumétrica específica se muestra a continuación en la figura 14.

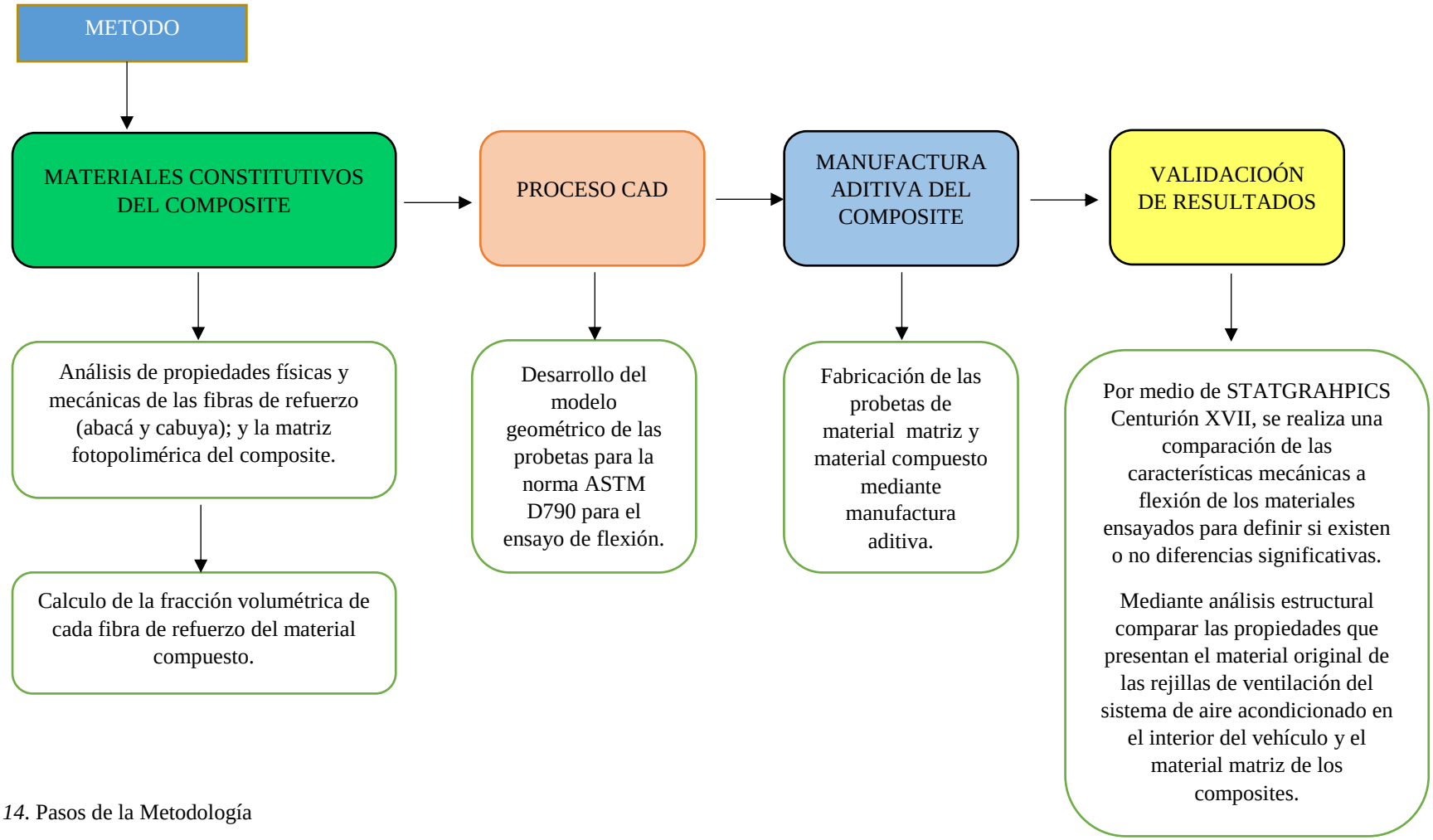



*Figura 14*. Pasos de la Metodología

## Materiales

**Materiales constitutivos del composite.** En el presente proyecto se utilizaron dos tipos de fibras naturales el abacá y la cabuya como elementos de refuerzos y un material fotopolimérico como matriz para la fabricación del material compuesto.

**Análisis de los elementos constitutivos del composite.** A continuación se describen en forma detallada las características físicas y mecánicas que poseen cada uno de los materiales que forman parte del material compuesto.

***Fibra de abacá.*** El abacá o cáñamo de manila (musa textiles) es una planta herbácea que pertenece a la familia de las Musáceas. … En el Ecuador se la ha clasificado en 5 calidades dependiendo principalmente de la posición que ocupan en el tallo (seudo tallo); es decir por su color. (Páez, 2007, pp. 13 - 14)

La primera fibra natural utilizada como refuerzo del composite es la fibra de abacá de calidad tipo 3 proporcionada por el Centro Textil Politécnico de la Universidad Politécnica Nacional proveniente de la provincia de Santo domingo de los Tsáchilas, la misma que se muestra en la figura 15.

*Figura 15.* Fibra de abacá

*Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de abacá.* En los estudios realizados por Biagiotti, Puglia y Kenny (2004) y Páez (2007) exponen las propiedades físicas y mecánicas que poseen esta fibra natural, las cuales se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de abacá.*

| Fibra | Densidad ($gr/cm^3$) | Diámetro (µm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Módulo de Young (GPa) |
|---|---|---|---|---|
| *Abacá* | 1.3 | 151.4 - 284 | 980 | 72 |

***Nota.*** Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de abacá. MPa= Megapascales, GPa = Gigapaspales, ($g/cm^3$) = unidad de medida de densidad del material. Adaptado de "A Review on Natural Fibre-Based Composites – Part I: Structure, Processing and Properties of Vegetable Fibres," por Biagiotti, J., Puglia, D. y Kenny, J., 2004, p. 59, y "Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión," por Páez, J., 2007, p. 15.

*Cálculo de la densidad de fibra de abacá.* Se tomó como referencia el procedimiento realizado por Jácome (2015) el cual utiliza el método gravimétrico para la determinación de la densidad de la fibra de piña.

Se seleccionó 4 muestras de fibra de abacá que fueron secadas en una estufa a una temperatura de 105 grados centígrados con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de humedad contenida en las fibras, posterior a ello se procedió al peso de las mismas, seguidamente se colocó en cuatro probetas graduadas agua destilada tomando en cuenta un mismo valor de volumen inicial para todas las probetas, luego se introdujo cada una de las muestras de fibra de abacá en cada probeta y se identificó en forma visual la variación del volumen del agua destilada, finalmente se calculó la densidad de la fibra aplicando la Ecuación 1 que se muestra a continuación.

**Ecuación 1**

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$\rho =$ Densidad de la fibra

$m =$ Masa de la fibra

$V =$ Volumen

Los detalles de los valores obtenidos de la densidad de la fibra de abacá se muestran en la tabla 1 del Anexo – A. Se tiene que la densidad promedio obtenida de la fibra de abacá luego del proceso experimental es la siguiente.

$$\rho = 1.226 \frac{gr}{cm^3}$$

***Fibra de cabuya.*** La cabuya es una planta nativa del Ecuador que se encuentra a lo largo del callejón interandino generalmente formando linderos. Esta fibra es extraída de la hoja de la cabuya (Furcraea Andina). Es una planta que crece en forma silvestre o cultivada en los valles y laderas de los Andes, la misma que pertenece a las Agaváceas. (Tamayo, 2012, p. 3)

La segunda fibra natural utilizada como refuerzo del composite es la fibra de cabuya proveniente de la provincia de Ibarra, la misma que se muestra en la figura 16.

*Figura 16.* Fibra de cabuya

*Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de cabuya.* En estudios previos realizados acerca de materiales compuestos reforzados con fibras naturales exponen las propiedades físicas y mecánicas que posee esta fibra natural, las cuales se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de cabuya.*

| Fibra | Densidad ($gr/cm^3$) | Diámetro (µm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Módulo de Young (GPa) |
|---|---|---|---|---|
| *Cabuya* | 0.87 | 50 - 200 | 305.15 | 7.52 |

***Nota.*** Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de cabuya. MPa= Megapascales, GPa = Gigapaspales, ($g/cm^3$) = unidad de medida de densidad del material. Adaptado de "Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación," por Tamayo, N., 2012, p. 4., "Fractografia de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster," por Contreras, M., Hormaza, W. y Marañón, A., 2009, p. 58. y "Fique fiber – reinforced polyester composites: Effects of fiber surface treatments on mechanical behavior", por Gañán, P. y Mondragón, I., 2004, p. 3122.

*Cálculo de la densidad de fibra de cabuya.* Para el cálculo de la densidad de la fibra de cabuya se replicó el procedimiento seguido para el cálculo de la densidad de la fibra de acaba.

Los detalles de los valores obtenidos de la densidad de la fibra de cabuya se muestran en la tabla 2 del Anexo – A. La densidad promedio obtenida de la fibra de cabuya luego del proceso experimental se muestra a continuación.

$$\rho = 0.665 \frac{gr}{cm^3}$$

***Matriz Fotopolimérica.*** El elemento usado como matriz del material compuesto es un fotopolímero que se usa dentro de la fabricación aditiva con la tecnología PolyJet.

*Figura 17.* Material Matriz

Los fotopolímeros PolyJet ofrecen un detalle fino además de un realismo en el producto final que sobrepasa a todas las demás tecnologías de impresión 3D. Muestran una capacidad camaleónica de simular materiales transparentes, flexibles y rígidos y plásticos de ingeniería e incluso la de combinar varios colores y propiedades de materiales en un modelo. El material transparente es un material rígido, prácticamente incoloro, que se caracteriza por una gran estabilidad dimensional para uso general, creación de modelos de gran detalle y simulación visual de termoplásticos transparentes tales como PMMA (Polometilmetacrilato). Stratasys (2017)

Las propiedades físicas y mecánicas del material utilizado como matriz del composite se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7**

*Propiedades físicas y mecánicas del material matriz del composite*

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

***Nota.*** Propiedades físicas y mecánicas del material matriz. MPa= Megapascales, GPa = Gigapaspales, ($g/cm^3$) = unidad de medida de densidad del material. Adaptado de "Stratasys", 2017, http://global72.stratasys.com/~/media/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_PJ_PJMaterialsDataSheet_0517aWeb.pdf#_ga=2.36894563.2117781069.1500566119-744947352.1500566119

**Cálculo de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo del composite.** Para realizar 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.

***Regla de las mezclas para compuestos reforzados por fibras.*** "La regla de las mesclas siempre dará la densidad de los compuestos reforzados con fibra" (Askeland, 1998, p. 517).

Askeland (1998) muestra la expresión matemática que nos 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 muestra a continuación en la ecuación 2.

**Ecuación 2**

$$\rho_c = f_m * \rho_m + f_f * \rho_f \quad (2)$$

En la cual:

$\rho_c =$ Densidad del material compuesto

$f_m =$ Fracción volumétrica de la matriz

$\rho_m =$ Densidad de la matriz

$f_f =$ Fracción volumétrica de la fibra

$\rho_f =$ Densidad de la fibra

Tomando en cuenta:

**Ecuación 3**

$$f_m = 1 - f_f \quad (3)$$

Para el análisis de estudio se propone una fracción volumétrica de fibra refuerzo del composite que es el 20 % para los dos tipos de fibras a utilizar como son el abacá y la cabuya respectivamente. Los detalles de los valores obtenidos se detallan en el Anexo – B.

**Manufactura aditiva del composite**. Para el proceso de fabricación se las probetas a ensayar se tomó en cuenta dos aspectos importantes que se describen a continuación.

***Desarrollo del modelo geométrico de las probetas.*** Para el desarrollo geométrico de las probetas del material compuesto se realizó bajo la norma ASTM 790 para el ensayo de flexión.

A continuación se presentan las dimensiones de las probetas fabricadas para tracción y flexión bajo las normas antes mencionadas.

*Dimensiones de la probeta de flexión.* Se seleccionó la norma ASTM 790 dado que este tipo de probetas son para polímeros reforzados con fibras. En la figura 18 se indican las dimensiones de la probeta a fabricar.

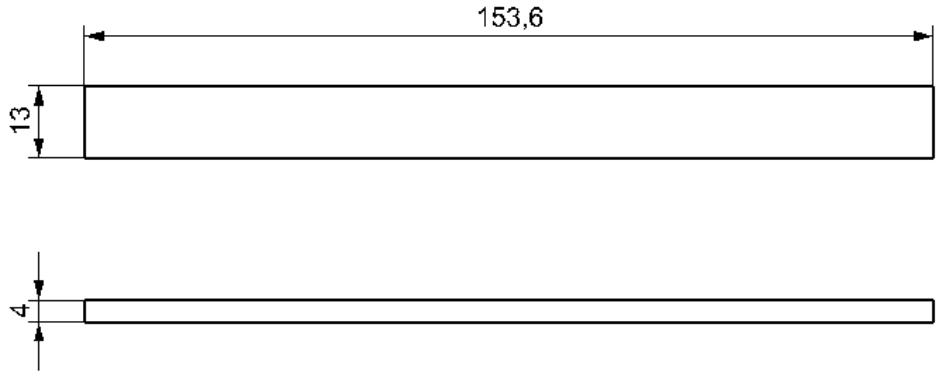



*Figura 18.* Dimensiones de probeta de flexión

***Fabricación aditiva de las probetas a ensayar.*** La fabricación aditiva de las probetas a ensayar se realiza en una impresora 3D con tecnología PolyJet.

A continuación se muestran las probetas fabricadas partiendo desde el material base y posteriormente el material compuesto reforzado con fibras de abacá y cabuya respectivamente para las probetas de flexión.

*Fabricación aditiva de probetas de flexión con material base.* En la figura 19 se muestra una de las probetas fabricadas mediante manufactura aditiva con el material base para realizar los ensayos de flexión.

*Figura 19.* Fabricación aditiva de probeta de flexión con material base

*Fabricación aditiva de probetas de flexión de material compuesto reforzado con fibras de abacá.* Las probetas fueron fabricadas tomando en cuenta las dimensiones que exige la norma ASTM 790.

En la figura 20 se muestra una de las probetas de flexión de material compuesto reforzado con fibras de abacá.

*Figura 20.* Fabricación aditiva de probeta de flexión del composite reforzado con fibras de abacá.

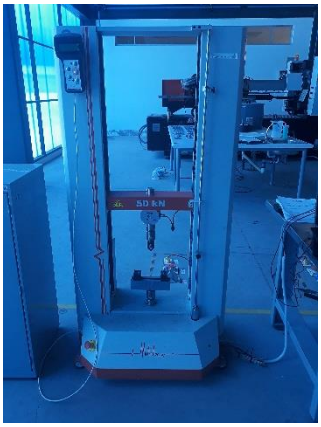
*Fabricación aditiva de probetas de flexión de material compuesto reforzado con fibras de cabuya.* En la figura 21 se muestran las probetas de flexión de material compuesto reforzado con fibras de cabuya.

*Figura 21.* Fabricación aditiva de probeta de flexión del composite reforzado con fibras de cabuya.

## Equipos

Los equipos que se utilizaron para la fabricación, ensayos mecánicos y microscopia electrónica de barrido de las probetas desde el material base hasta las probetas de material compuesto en sus diferentes configuraciones se muestran a continuación.

**Máquina universal de ensayos**. Es una máquina universal de ensayos para materiales poliméricos, compuestos y metales ligeros. En este caso se utilizó este equipo para la realización de los ensayos de flexión, ya que permite el intercambiar las partes interiores dependiendo del tipo de ensayo a realizar.



| MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS | |
|---|---|
| Marca | Metrotec |
| Serie | MTE 50 |
| Capacidad | 50 KN |

*Figura 22.* Máquina universal de ensayos.

**Impresora 3D**. La impresora 3D que se utilizó para la fabricación aditiva de todas las probetas para la presente investigación utiliza la tecnología PolyJet, la cual trabaja con varios materiales de ingeniería, que en nuestro caso como material matriz del composite se utilizó un fotopolímero.

| | IMPRESORA 3D | |
|---|---|---|
| | Modelo | Objet 30 PRO |
| | Tecnología | PolyJet |
| | Capacidad de Impresión neta | Largo: 300 mm<br>Ancho: 200 mm<br>Alto: 150 mm |

*Figura 23.* Impresora 3D de tecnología PolyJet; *(http://3dmanufacturing.mx/fichas/objet30-pro-ESLA-09-13.pdf)*

**Estufa**. La estufa de secado se utilizó para la eliminación de humedad que poseen las fibras de abacá y cabuya al encontrarse en el ambiente, este tipo de estufa permite visualizar la cantidad de temperatura a la cual esta calibrada.

*Figura 24.* Estufa para secado de fibras; *(https://www.pol-eko.com.pl/wp-content/uploads/2016/08/SLN-53.jpg)*

**Microscopio Electrónico de Barrido**. El microscopio Electrónico de Barrido nos permite obtener micrografías de la sección transversal de las probetas ensayadas a flexión, tomando en cuenta las tres configuraciones realizadas en la presente investigación.

| | | |
|---|---|---|
| | MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO | |
| | Marca | ASPEX |
| | Modelo | PSEM eXpress |
| | Rango de detección | 500 nm a 5 mm |

*Figura 25.* Microscopio Electrónico de Barrido; *(http://www.sietronics.com.au/acexpress.pdf)*

El software que se utiliza para la simulación estructural de los materiales es el NX 10, el cual es una potente herramienta de simulación a nivel de ingeniería.

*Figura 26.* Siemens NX 10; (https://www.google.com/search?q=nx+10+siemens&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiH7t7kh_vcAhVF0FkKHSovAJkQ_AUICigB&biw=1366&bih=654#imgrc=FD9G6-EpvZMPbM.)

# RESULTADOS

En el presente capitulo se presenta 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.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de flexión de cada una de las configuraciones fabricadas.

## Resultados del ensayo de flexión del material matriz

Se realizó la manufactura aditiva de 5 probetas para ensayos de flexión bajo la norma ASTM 790 del material matriz con la finalidad de tener valores referenciales de este material, en la figura 27 se muestran las probetas en las cuales se identificar que se generó fractura posterior a ser ensayadas.

*Figura 27.* Probetas ensayadas del material matriz

**Datos resultantes del ensayo de flexión del material matriz.** En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de flexión del material matriz del composite.

**Tabla 8**

*Resultados de ensayo de flexión de material matriz*

| Probeta | Fuerza Máxima (N) | Esfuerzo Máximo de Flexión (MPa) | Módulo de Elasticidad secante de Flexión (MPa) | Deformación máxima (%) | Deflexión (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 194,07 | 91,21 | 1435,10 | 5,90 | 9,816 |
| **2** | 168,82 | 83,49 | 1838,94 | 4,21 | 7,187 |
| **3** | 168,82 | 83,62 | 1483,27 | 5,23 | 8,924 |
| **4** | 205,11 | 101,75 | 1776,81 | 5,31 | 9,065 |
| **5** | 209,85 | 103,78 | 1914,09 | 5,03 | 8,583 |
| **Promedio** | 189,33 | 92,77 | 1689,64 | 5,14 | 8,72 |

***Nota.*** Las probetas de flexión del material matriz del composite se fabricaron mediante impresión 3D con tecnología PolyJet y los ensayos se realizaron en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua.

En la tabla 8 podemos identificar valores promedios de tres variables importantes como son el Esfuerzo máximo de flexión de 92,77 MPa, Módulo de elasticidad secante a la flexión de 1689,64 MPa y una Deflexión de 8,72 mm.

En la figura 28 se muestran las gráficas resultantes del ensayo de flexión realizadas a las 5 probetas de material matriz del composite, en coordenadas Fuerza de Rotura, Desplazamiento.

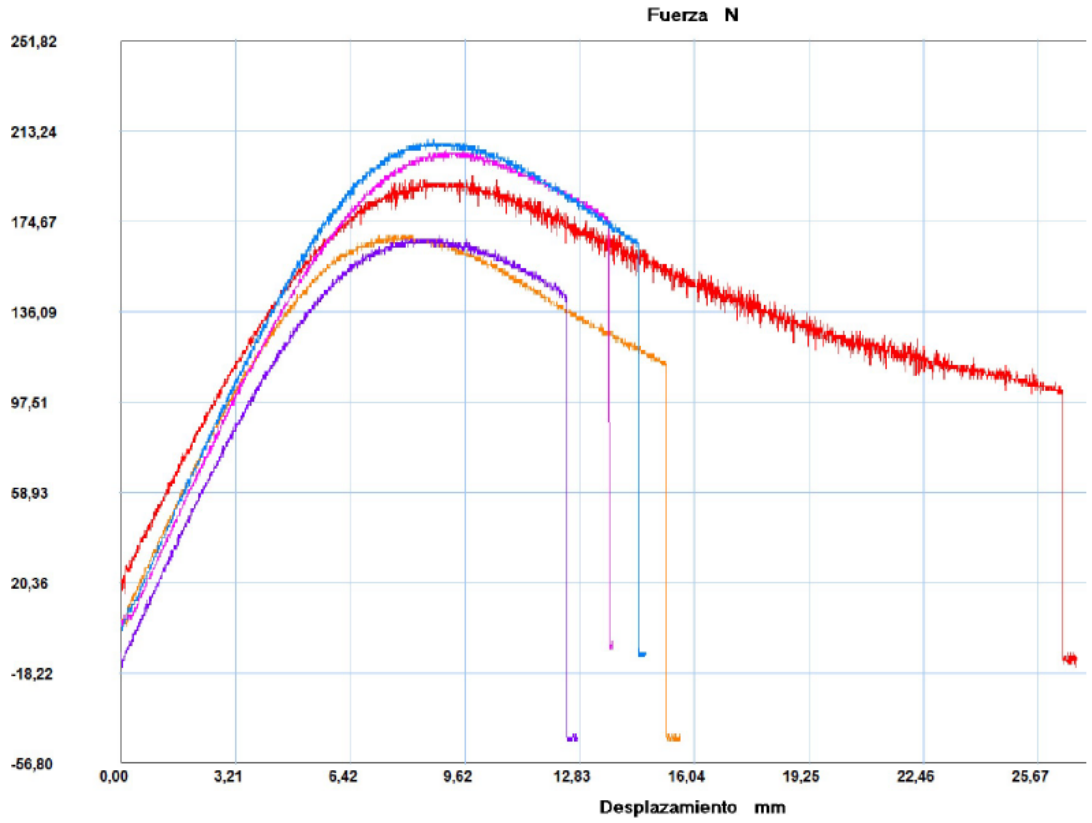
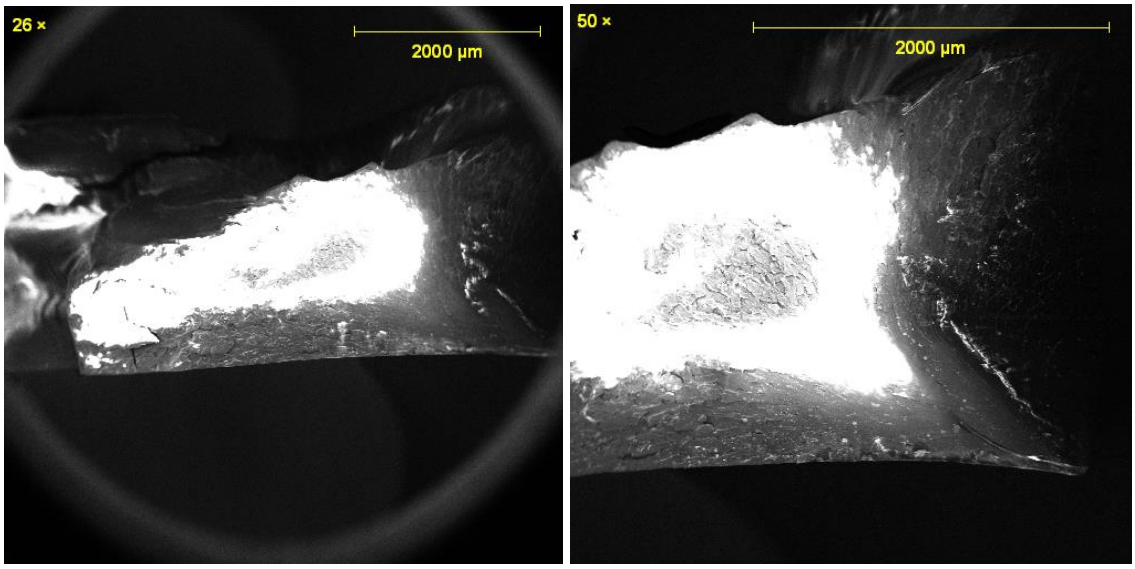
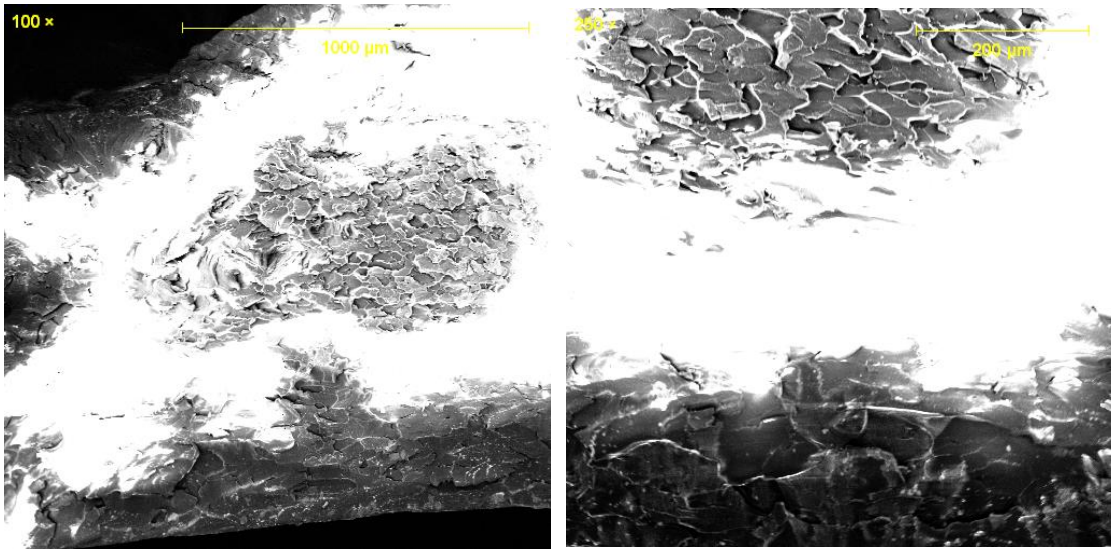



*Figura 28.* Resultados gráficos del ensayo de flexión aplicado al material matriz del composite; *(Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua)*

**Microscopia Electrónica de barrido del material matriz.** En la figura 29 se muestran las micrografías de la sección transversal de la resina fotopolimérica, material matriz de los materiales compuestos.




a) b)




c) d)

*Figura 29.* Resina fotopolimérica, material matriz de los materiales compuestos. a) 26X, b) 50X, c) 100X y d) 250X.

Las micrografías mostradas se realizaron a una de las probetas posterior al ensayo de flexión, las cuales fueron realizadas a diferente alcance con la finalidad de constatar si la probeta presenta una superficie homogénea o a su vez existen grietas internas entre sus capas impresas.

La micrografía realizada con un alcance de 250X nos permite verificar que la impresión 3D de las probetas ensayadas es bastante homogénea y no presenta fisuras internas, por lo que esto nos permite consolidar los valores de las propiedades mecánicas del material matriz obtenidas luego del ensayo de flexión.

**Resultados del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de abacá**

Se realizó la manufactura aditiva de 5 probetas para ensayos de flexión bajo la norma ASTM 790 del composite reforzado con fibras de abacá, en la figura 30 se muestran las probetas luego de ser ensayadas.

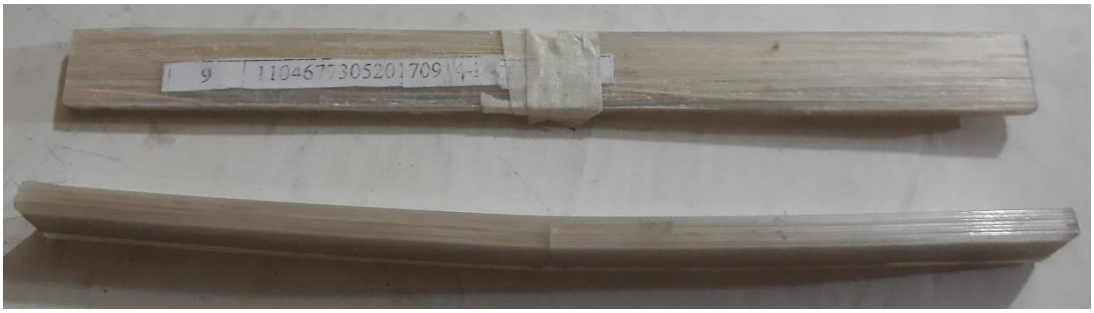


*Figura 30.* Probetas ensayadas del composite reforzadas con fibra de abacá

Se puede observar en la figura anterior que 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.

**Datos resultantes del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de abacá.**

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de flexión del material compuesto reforzado con el 20 % de fibra de abacá bajo la norma ASTM 790.

**Tabla 9**

*Ensayo de flexión del material compuesto reforzado con fibra de abacá*

| Probeta | Fuerza Máxima (N) | Esfuerzo Máximo de Flexión (MPa) | Módulo de Elasticidad secante de Flexión (MPa) | Deformación máxima (%) | Deflexión (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 187,76 | 96,54 | 2154,44 | 4,16 | 7,238 |
| **2** | 145,16 | 73,17 | 2001,32 | 3,30 | 5,697 |
| **3** | 165,67 | 83,83 | 2447,25 | 3,18 | 5,491 |
| **4** | 127,8 | 61,28 | 1952,42 | 2,91 | 4,907 |
| **5** | 143,58 | 72,85 | 2501,22 | 2,70 | 4,681 |
| **Promedio** | 153,99 | 77,53 | 2211,33 | 3,25 | 5,60 |

***Nota.*** Las probetas de flexión del composite se fabricaron mediante impresión 3D con tecnología PolyJet y los ensayos se realizaron en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua.

En la tabla 9 se puede identificar valores promedios de tres variables importantes del primer material compuesto reforzado con fibra de abacá como son el Esfuerzo máximo de flexión de 77,53 MPa, Modulo de elasticidad secante a la flexión de 1811,07 MPa y una Deflexión de 5,60 mm.

En la Figura 31 se muestran las gráficas del ensayo de flexión realizadas a las 5 probetas del composite reforzadas con fibra de abacá, en coordenadas Fuerza de Rotura, Desplazamiento.

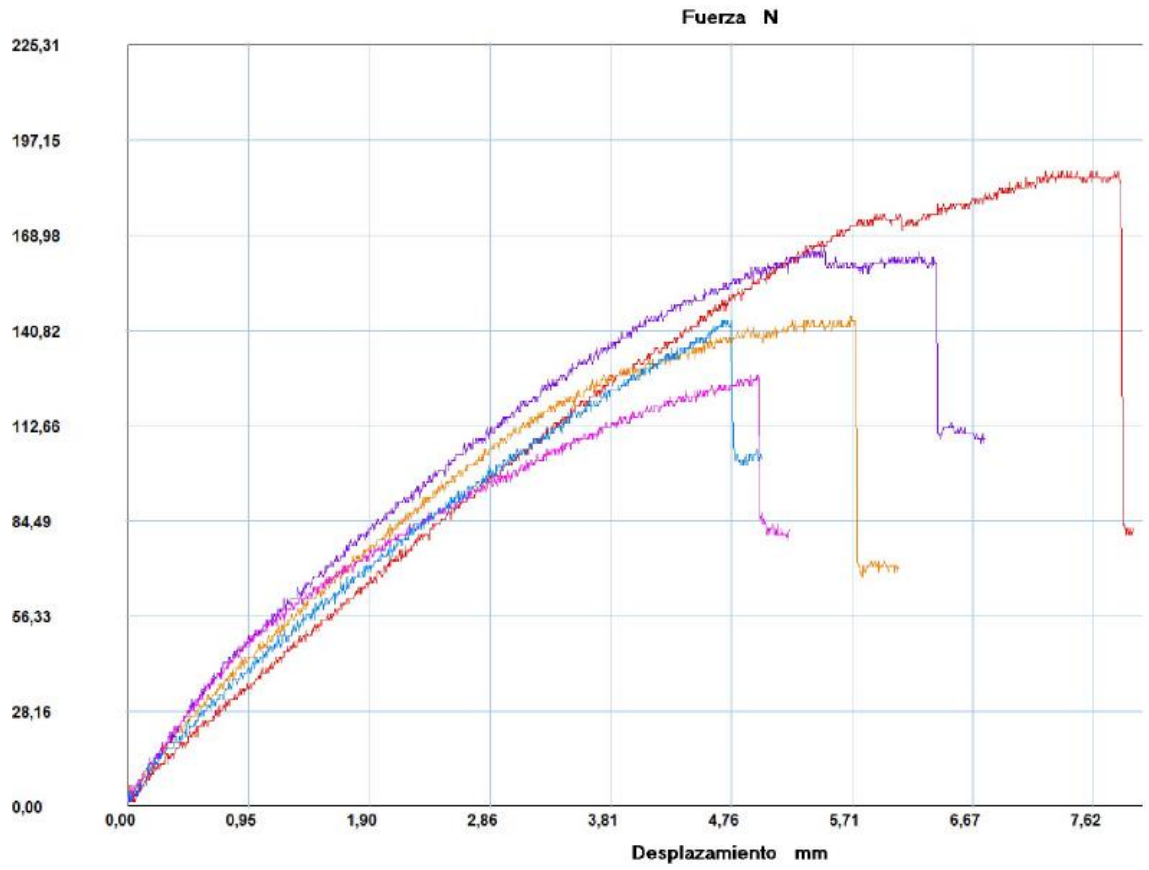



*Figura 31.* Resultados gráficos del ensayo de flexión aplicado al composite reforzado con fibra de abacá; *(Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua)*

**Microscopia Electrónica de barrido del composite reforzado con fibra de abacá.** En la figura 32 se muestra una microscopia electrónica de barrido que se realizó a una de las probetas ensayadas en el área de la fractura posterior al ensayo de flexión.

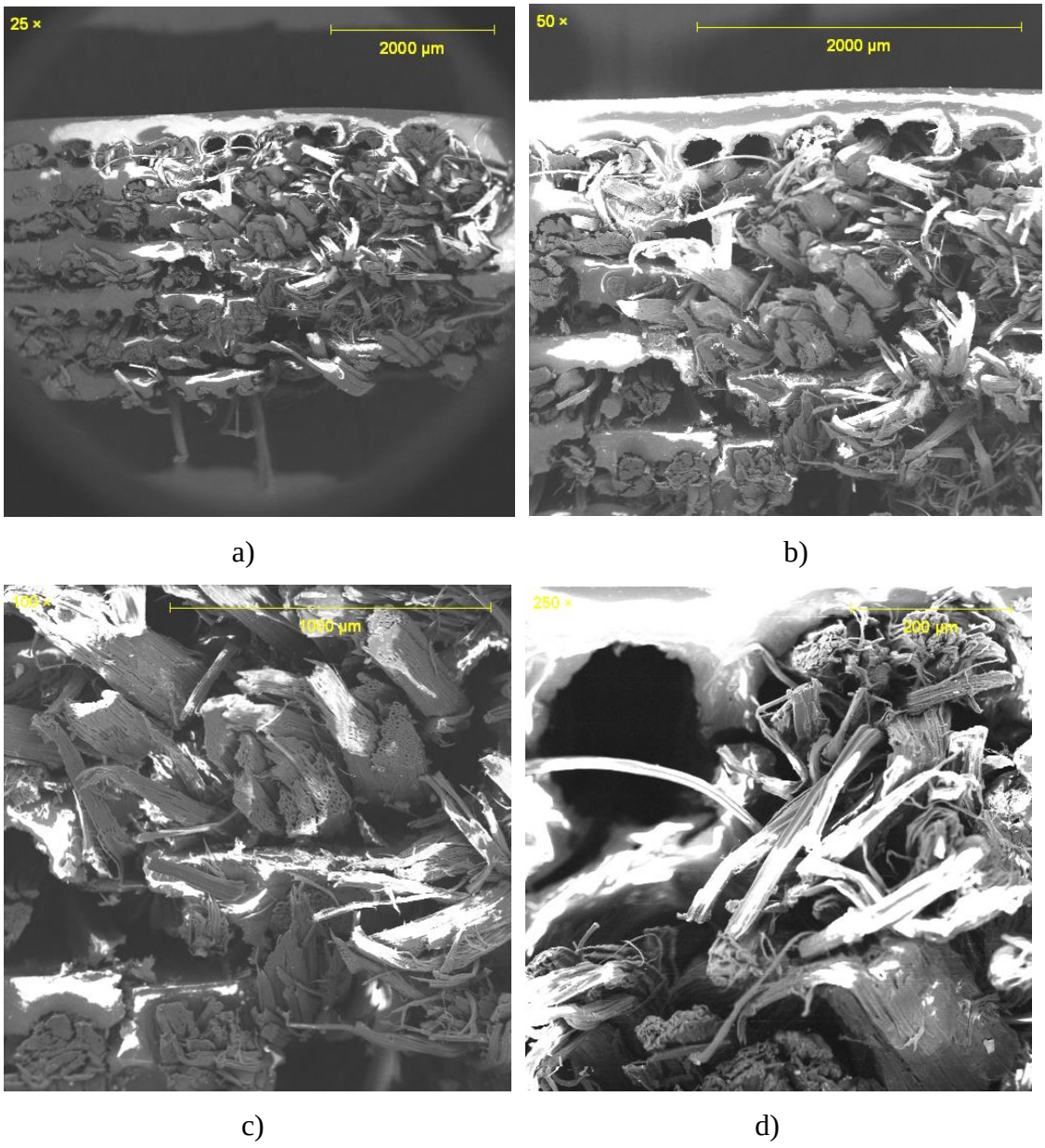



*Figura 32*. Material compuesto reforzado con fibra de abacá. a) 25X, b) 50X, c) 100X y d) 250X.

Las micrografías mostradas se realizaron a una de las probetas de material compuesto posterior al ensayo de flexión, las cuales fueron realizadas a diferente alcance con la finalidad de constatar si existe una buena interfaz entre la matriz polimérica y la fibra natural de abacá.

La micrografía realizada 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.

**Resultados del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de cabuya**

Se realizó la manufactura aditiva de 5 probetas para ensayos de flexión bajo la norma ASTM 790 del composite reforzado con fibras de cabuya, en la figura 33 se muestran las probetas luego de ser ensayadas.

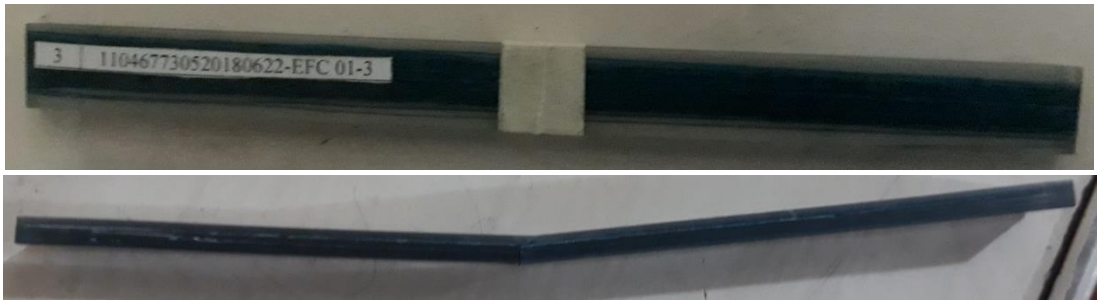



*Figura 33.* Probetas ensayadas del composite reforzadas con fibra de cabuya

Se puede observar en la figura antes mostrada que 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.

**Datos resultantes del ensayo de flexión del composite reforzado con fibra de cabuya.**

En la Tabla 10 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.

**Tabla 10**

*Ensayo de flexión del material compuesto reforzado con fibra de cabuya*

| Probeta | Fuerza Máxima (N) | Esfuerzo Máximo de Flexión (MPa) | Módulo de Elasticidad secante de Flexión (MPa) | Deformación máxima (%) | Deflexión (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 194,07 | 87,73 | 1629,86 | 5,38 | 9,209 |
| **2** | 170,4 | 75,65 | 2175,31 | 3,48 | 5,906 |
| **3** | 198,8 | 89,12 | 1714,45 | 5,20 | 8,784 |
| **4** | 171,98 | 76,78 | 1672,84 | 4,59 | 7,775 |
| **5** | 194,07 | 87,00 | 1837,68 | 4,73 | 8,000 |
| **Promedio** | 185,864 | 83,26 | 1806,03 | 4,68 | 7,93 |

***Nota.*** Las probetas de flexión del composite se fabricaron mediante impresión 3D con tecnología PolyJet y los ensayos se realizaron en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua.

En la tabla 10 se puede identificar valores promedios de tres variables importantes del segundo material compuesto reforzado con fibra de cabuya como son el Esfuerzo máximo de flexión de 83,26 MPa, Modulo de elasticidad secante a la flexión de 1806,03 MPa y una Deflexión de 7,93 mm; los mismos que nos servirán para la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales ensayados.

En la Figura 34 se muestran las gráficas del ensayo de flexión realizadas a las 5 probetas del composite reforzadas con fibra de cabuya, en coordenadas Fuerza de Rotura, Desplazamiento.

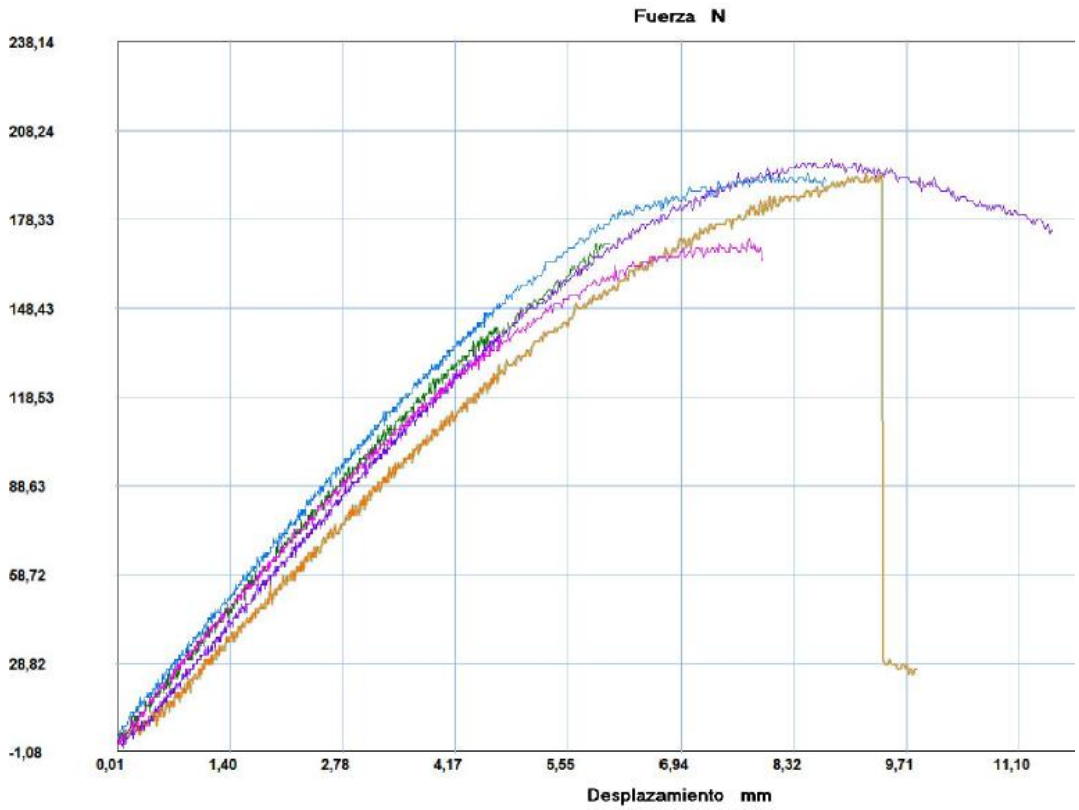
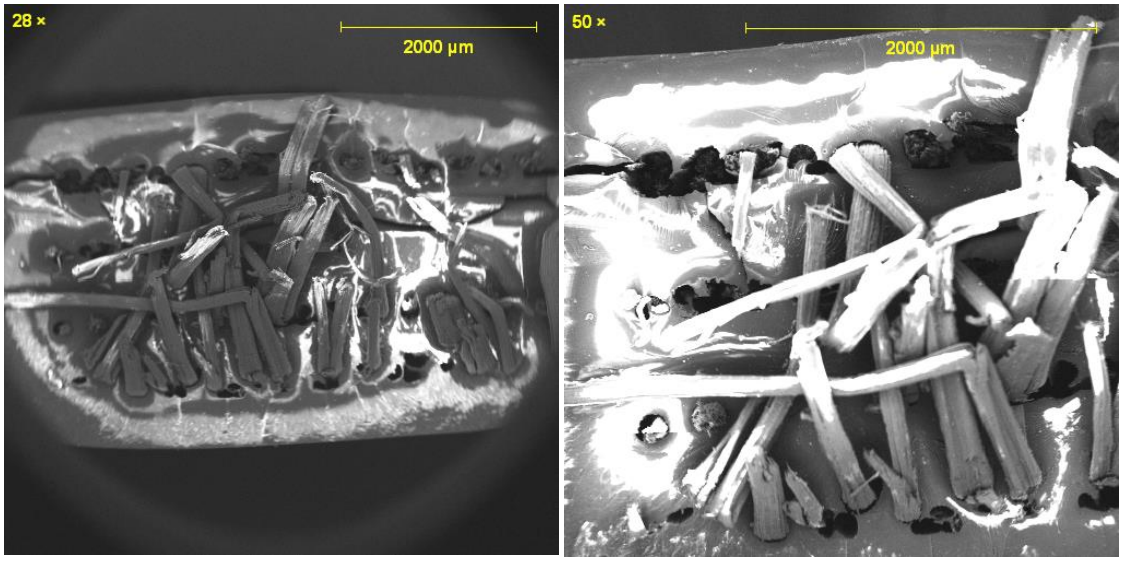
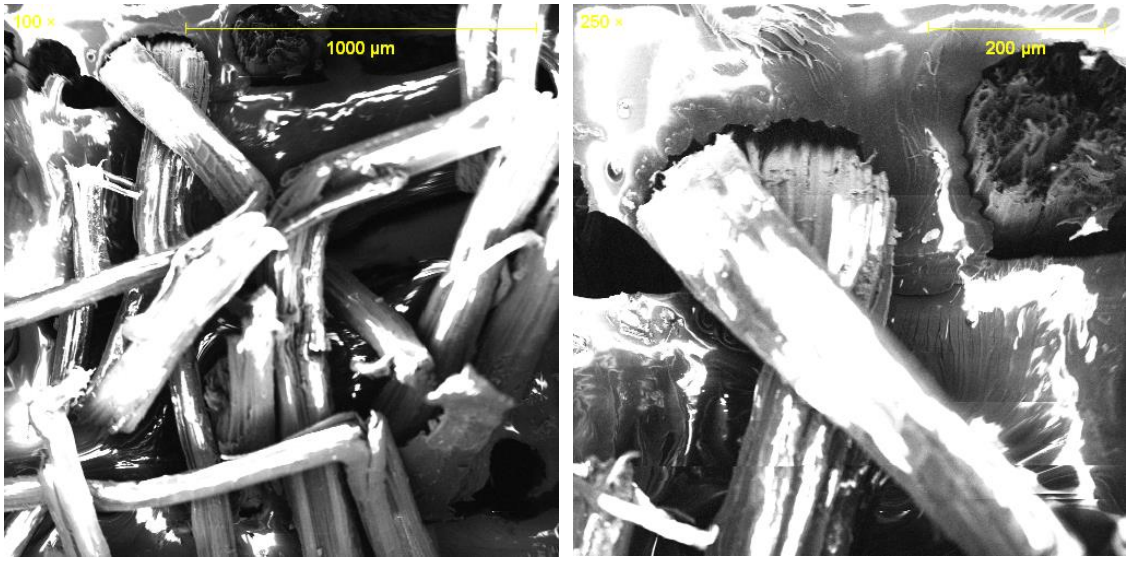



*Figura 34.* Resultados gráficos del ensayo de flexión aplicado al composite reforzado con fibra de cabuya; *(Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero – Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua).*

**Microscopia Electrónica de barrido del composite reforzado con fibra de cabuya.** En la figura 35 se muestra una microscopia electrónica de barrido que se realizó a una de las probetas ensayadas en el área de la fractura posterior al ensayo de flexión.




a) b)




c) d)

*Figura 35.* Material compuesto reforzado con fibra de cabuya. a) 28X, b) 50X, c) 100X y d) 250X.

Las micrografías mostradas se realizaron a una de las probetas de material compuesto posterior al ensayo de flexión, las cuales fueron realizadas 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 realizada 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.

**Resultados de la simulación estructural de las rejillas de aire acondicionado**

La simulación estructural se realizó con la ayuda del software NX 10 de Siemens con la finalidad 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.

**Rejillas de aire acondicionado de Polipropileno.** En la figura 36 se puede observar los valores correspondientes al desplazamiento nodal máximo que se genera en las rejillas de aire acondicionado dando un valor promedio de 0.0260 mm.

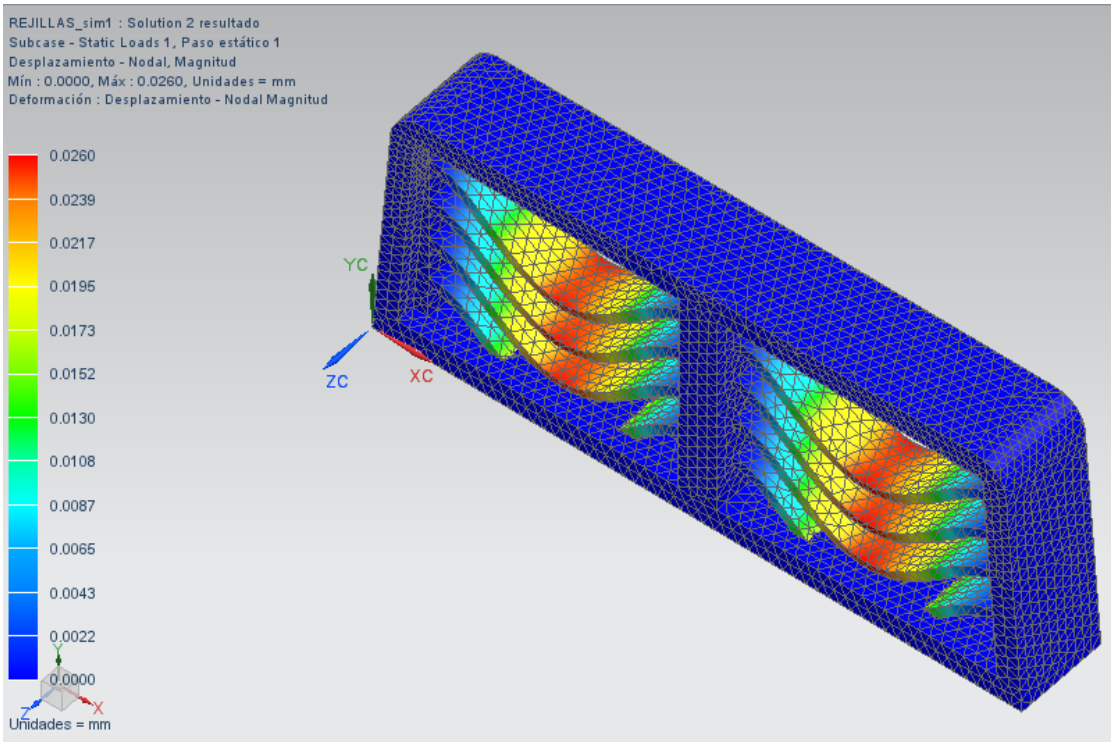



*Figura 36.* Grafica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado

En la figura 37 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.

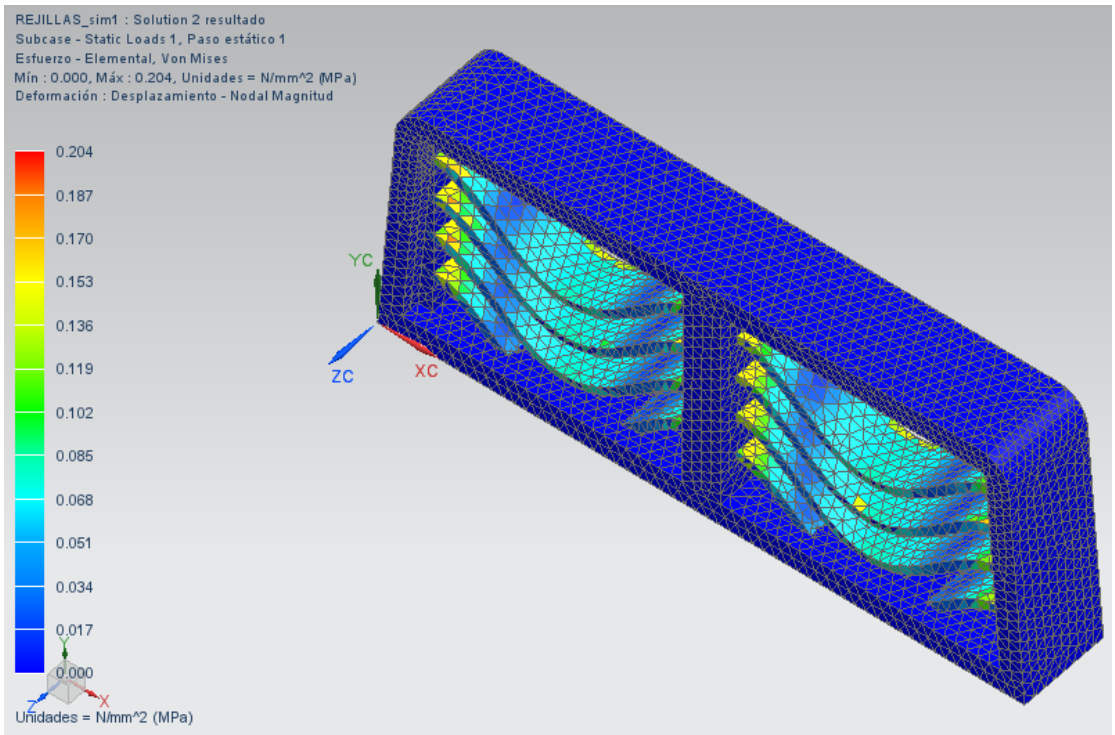



*Figura 37.* Grafica de esfuerzos generados en las rejillas de aire acondicionado

**Rejillas de aire acondicionado del Material matriz de los composites.** En la figura 38 se puede observar los valores correspondientes al desplazamiento nodal máximo que se genera en las rejillas de aire acondicionado dando un valor promedio de 0.0487 mm.

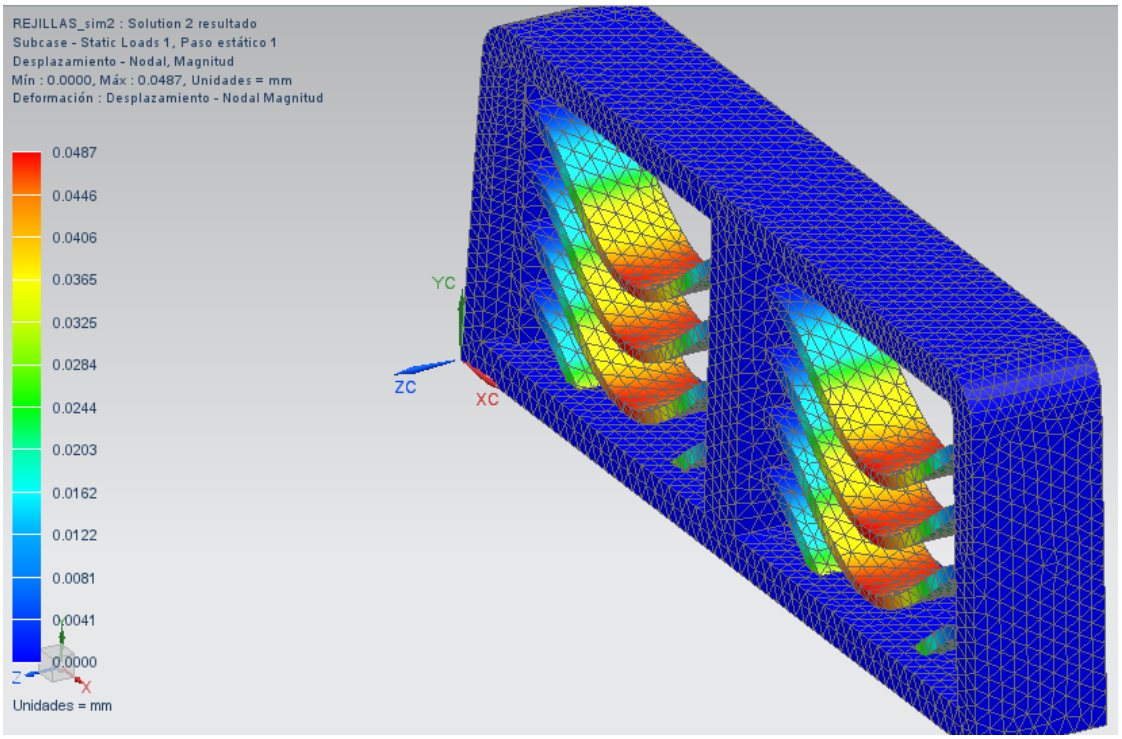



*Figura 38.* Grafica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado

En la figura 39 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 0.206 MPa como esfuerzo máximo.

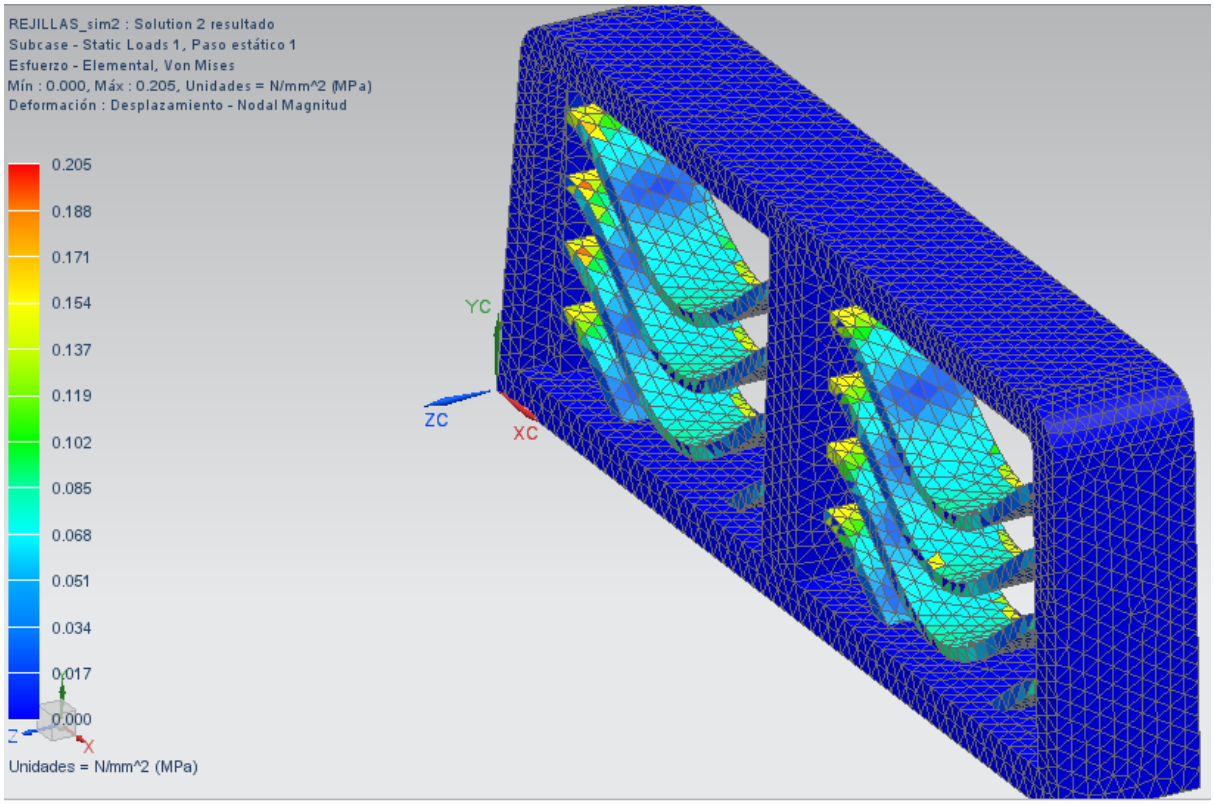



*Figura 39.* Grafica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado

Cabe resaltar que en los dos tipos de análisis estructural se aplicó una fuerzo 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 un masa (0.4989 Kg) que al multiplicar por el valor de la gravedad (9.81 $m/s^2$) nos va un valor promedio a 5 N, la misma que genero una deformación de la rejilla en forma experimental como se muestra en la figura 40.

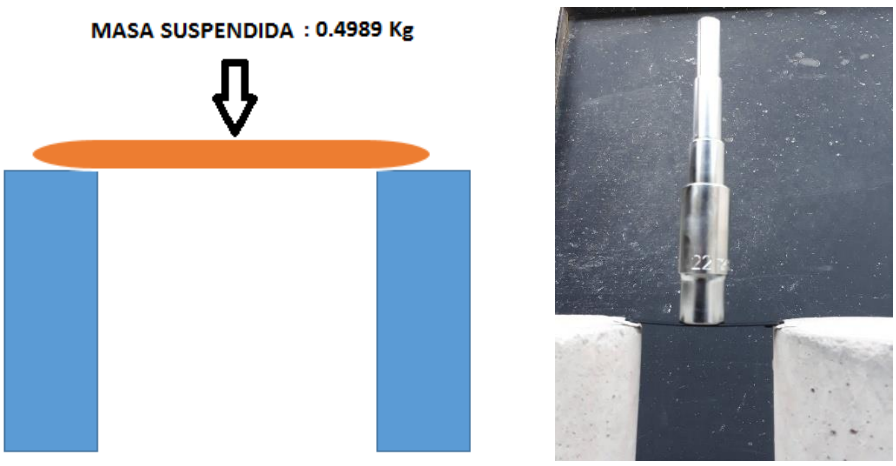



*Figura 40.* Idealización para el cálculo de la carga aplicada a las rejillas de aire acondicionado

# DISCUSIÓN DE RESULTADOS

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 utilizó la técnica de 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.

## Esfuerzo máximo de flexión

La tabla 11 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 11**

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

| Material | Casos | Media | Grupos homogéneos |
|---|---|---|---|
| **Compuesto reforzado con Abacá (2)** | 5 | 77,534 | X |
| **Compuesto reforzado con Cabuya (3)** | 5 | 83,256 | XX |
| **Material Matriz (1)** | 5 | 92,77 | X |

***Nota.*** Se designó a cada material con un número identificativo dentro del análisis, para el material matriz el número 1, para el compuesto reforzado con fibra de Abacá el número 2 y para el compuesto reforzado con fibra de cabuya el número 3.

Se puede observar en la tabla 11 que entre el material (1) y (2) existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza, tomando en cuenta que en la columna de grupos homogéneos de estos dos materiales no comparten una misma columna de X. Por otro lado hay que resaltar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos grupos de materiales que comparten una misma columna de X, en primera instancia un grupo lo componen los materiales (2) y (3), y un segundo grupo lo componen los materiales (1) y (3).

En la figura 41 se muestra en forma gráfica la comparación de las medias del esfuerzo máximo de flexión de los materiales estudiados, mediante el método de las diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher con el 95% de confianza.

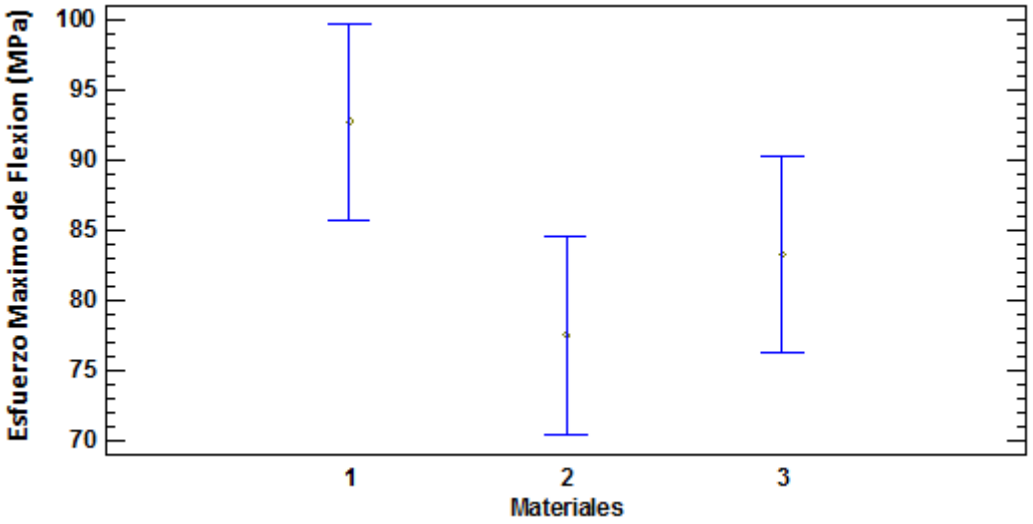



*Figura 41*. Comparación de medias con el 95% por la prueba LSD.

El esfuerzo máximo de flexión 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 42 que se muestra a continuación.

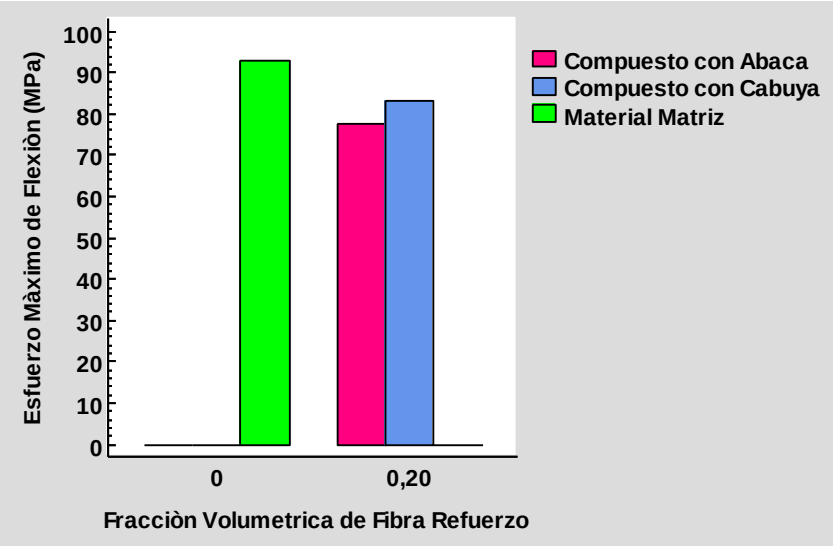


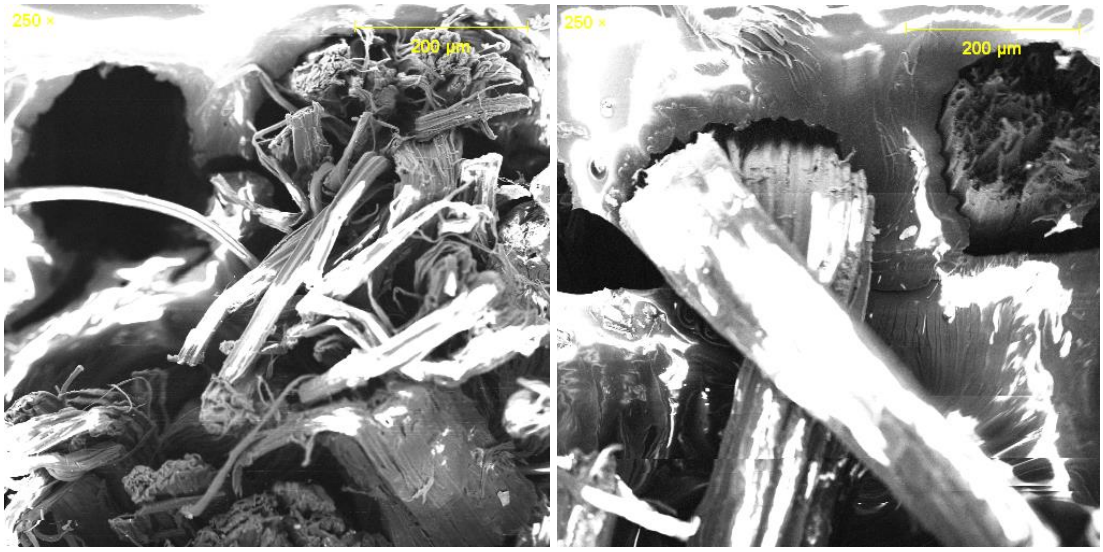

*Figura 42*. Esfuerzo máximo de flexión de materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo.

La disminución del esfuerzo máximo de flexión para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de abacá tuvo un valor del 16,44 %, mientras que para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de cabuya tuvo un valor del 10,255%.

Cabe mencionar que en la investigación realizada por Pontón y Guerrero (2010) el resultado del esfuerzo máximo de flexión de un material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra longitudinal de Abacá mediante estratificación manual con una fracción volumétrica del 20 % (100 MPa) tuvo un incremento con respecto al material matriz utilizado en este estudio, 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 (77,534 MPa) tuvo una disminución con respecto al material matriz, hay que tomar en cuenta, que en el estudio del material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra de abacá antes mencionado, se realizó un pre-mojado de las fibras con resina poliéster diluida con estireno al 10 % v/v y el sistema catálico constituido por octoato de cobalto y MEKP en concentraciones del 0,5 y 0,75%; lo cual favoreció la adhesión de las fibras de refuerzo en la matriz de dicho material compuesto (Pontón y Guerrero, 2010).

Por otro lado en el estudio realizado por Tamayo (2012) el resultado del 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 % (51,39 MPa) tuvo una disminución con respecto al material matriz analizado en ese estudio, lo cual es comparable al resultado obtenido del esfuerzo máximo de flexión del material compuesto reforzado con fibra longitudinal de cabuya en una fracción volumétrica del 20 % fabricado mediante impresión 3D (83,256 MPa) que de la misma manera tuvo una disminución con respecto al material matriz (Tamayo, 2012).

La disminución de esta propiedad mecánica de los materiales compuestos con respecto al material matriz está relacionada directamente con lo que se pudo evidenciar en los resultados obtenidos en las micrografías de los compuestos antes mencionados, ya que presentaron una pobre interfaz entre el material matriz y la fibra refuerzo como se muestra en la figura 43.




a) b)

*Figura 43*. a) Microscopia de material compuesto reforzado con Abacá, b) Microscopia de material compuesto reforzado con Cabuya.

Se debe indicar que para los dos casos de material compuesto ensayados las probetas no sufrieron una rotura total en el área en la que se aplicó la carga en los ensayos de flexión, por ende se puede mencionar que solo sufrió la rotura el material matriz, por tal razón también se ve influenciado en la disminución de los valores finales del esfuerzo máximo de flexión ya que los esfuerzos no se transmitieron en forma adecuada desde la matriz a la fibra refuerzo porque existía una pobre interfaz de los materiales compuestos tal como se muestra en la figura 44 y figura 45 respectivamente.

*Figura 44*. Probeta de material compuesto reforzado con fibra de Abacá luego del ensayo de flexión

*Figura 45.* Probeta de material compuesto reforzado con fibra de Abacá luego del ensayo de flexión

## Módulo de Elasticidad a la Flexión

La tabla 12 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias de módulo de elasticidad son significativamente diferentes de otras entre los materiales fabricados.

**Tabla 12**

*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 |

***Nota.*** Se designó a cada material con un número identificativo dentro del análisis, para el material matriz el número 1, para el compuesto reforzado con fibra de Abacá el número 2 y para el compuesto reforzado con fibra de cabuya el número 3.

Se puede observar en la tabla 12 que los materiales (1) y (3) presentan diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95 % de confianza con respecto al material (2), tomando en cuenta que en la columna de grupos homogéneos estos dos materiales no comparten una misma columna de X con el material (2). Por otro lado hay que resaltar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos grupos de materiales que comparten una misma columna de X, en este caso son el material (1) y (3).

En la figura 46 se muestra en un gráfico caja y bigotes la comparación de las medias del módulo de elasticidad de los materiales estudiados, mediante el método de las diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher con el 95% de confianza.

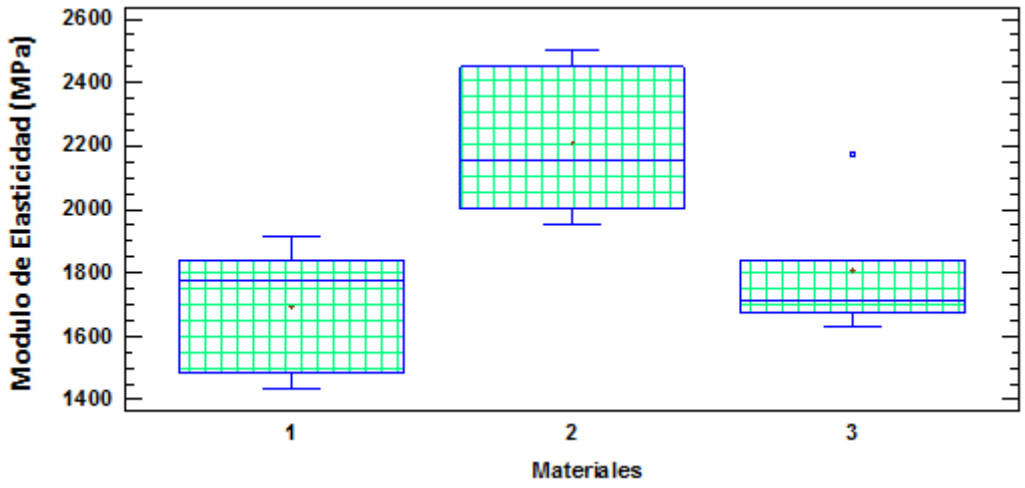



*Figura 46.* Grafico Caja y Bigotes para el módulo de elasticidad a la flexión

El módulo de elasticidad que presentan los materiales compuestos reforzados con fibra longitudinal de abacá y cabuya respectivamente, tuvo un incremento con respecto al material matriz de resina fotopolimérica como se puede observar en la figura 47 que se muestra a continuación.

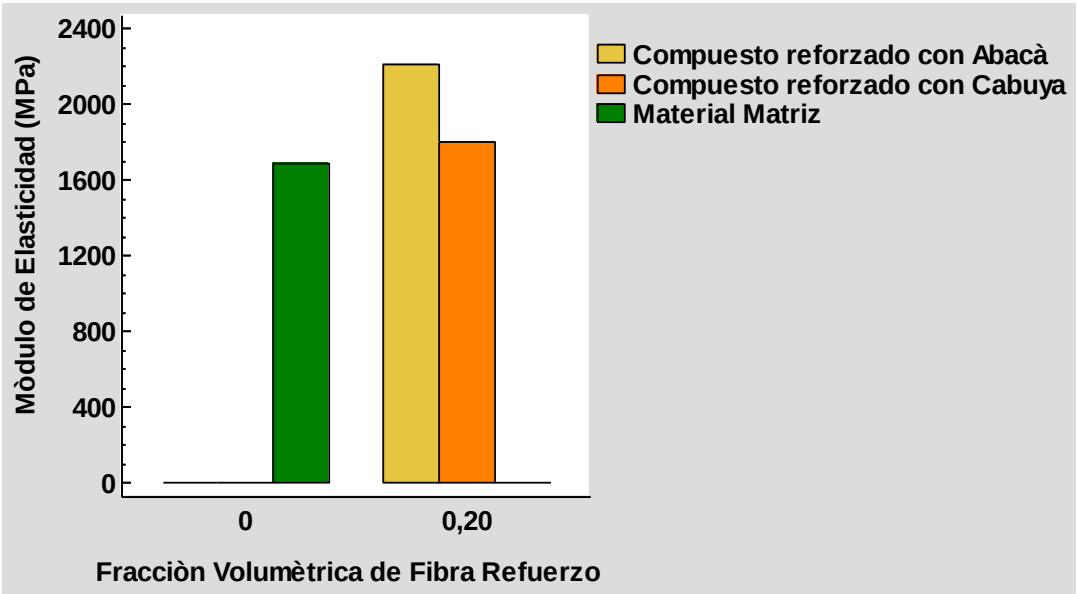



*Figura 47.* Módulo de elasticidad a la flexión de materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo.

El incremento del módulo de elasticidad para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de abacá tuvo un valor del 30,875 %, mientras que para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de cabuya tuvo un valor del 6,888%.

Es importante resaltar que en el estudio realizado por Ponce (2011) el resultado del 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) aumento con respecto al material matriz analizado en ese estudio, lo cual es comparable al 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 (Ponce,2011).

Adicionalmente en el estudio realizado por Tamayo (2012) el resultado del 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 % ( 2355,58 MPa) aumento con respecto al material matriz analizado en ese estudio, lo cual es comparable al 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 (1806,03 MPa) que de la misma manera tuvo un aumento con respecto al material matriz (Tamayo,2012).

Tomando en cuenta los resultados obtenidos nos permiten determinar un aumento en la rigidez de los materiales compuestos con respecto al material matriz y que a su vez se complementan con los valores de módulo de elasticidad obtenidos luego de los ensayos a flexión, por lo tanto hay que resaltar que en esta propiedad mecánica tuvo una influencia positiva las fibras de Abacá y Cabuya respectivamente, actuando como elemento de refuerzo de los materiales compuestos.

## Deflexión

La tabla 13 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias de deflexión son significativamente diferentes de otras entre los materiales fabricados.

**Tabla 13**

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

| Material | Casos | Media | Grupos homogéneos |
|---|---|---|---|
| **Compuesto reforzado con Abacá (2)** | 5 | 5,6028 | X |
| **Compuesto reforzado con Cabuya (3)** | 5 | 7,9348 | X |
| **Material Matriz (1)** | 5 | 8,715 | X |

***Nota.*** Se designó a cada material con un número identificativo dentro del análisis, para el material matriz el número 1, para el compuesto reforzado con fibra de Abacá el número 2 y para el compuesto reforzado con fibra de cabuya el número 3.

Se puede observar en la tabla 13 que los materiales (1) y (3) presentan diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza con respecto al material (2), tomando en cuenta que en la columna de grupos homogéneos estos dos materiales no comparten una misma columna de X con el material (2). Por otro lado hay que resaltar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos grupos de materiales que comparten una misma columna de X, en este caso son el material (1) y (3).

En la figura 48 se muestra en un gráfico caja y bigotes la comparación de las medias de la deflexión de los materiales estudiados, mediante el método de las diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher con el 95% de confianza.

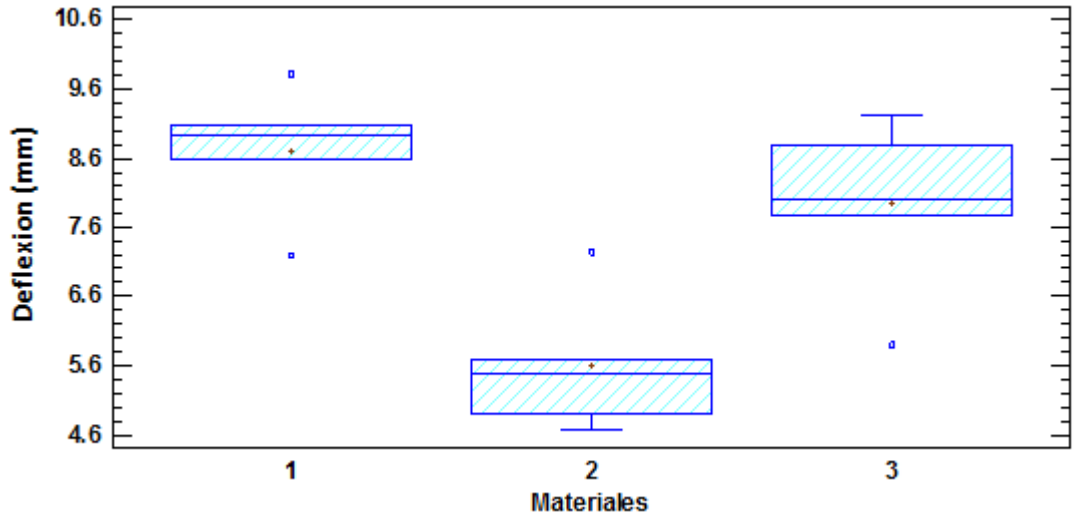



*Figura 48.* Grafico Caja y Bigotes para la deflexión.

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 49 que se muestra a continuación.

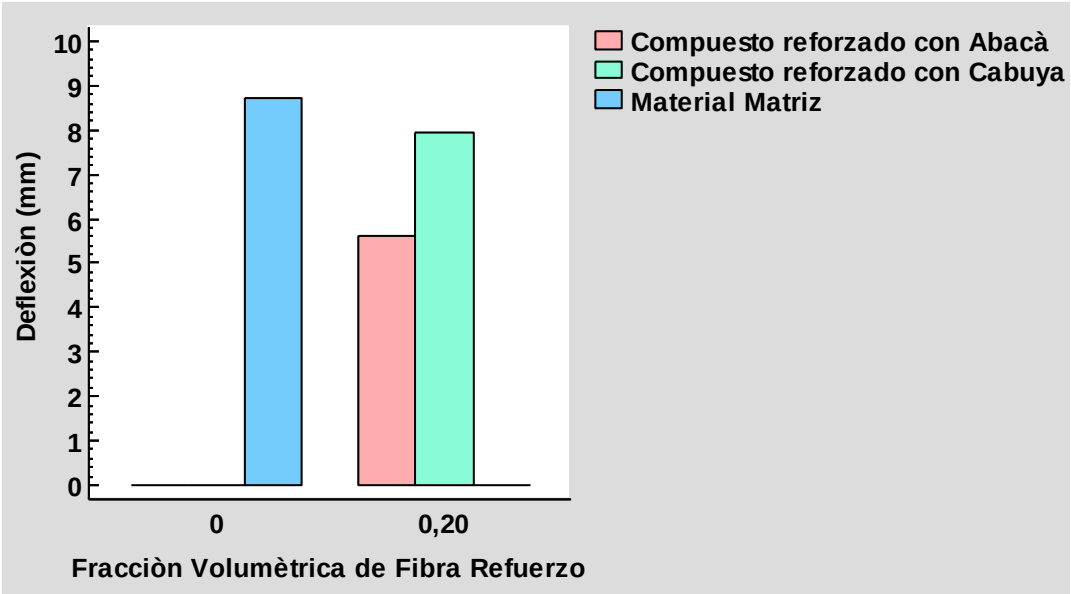



*Figura 49.* Deflexión de materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo.

La disminución del esfuerzo máximo de flexión para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de abacá tuvo un valor del 35,711%, mientras que para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de cabuya tuvo un valor del 8,953%.

Tomando en cuenta los valores de deflexión obtenidos de los materiales compuestos con respecto a la matriz, su disminución se debe a la presencia de una pobre adhesión entre la fibra refuerzo y la matriz como se verifico en los resultados en las micrografías realizadas, por tal razón las fibras no aportaron a mejorar esta característica mecánica de los materiales compuestos fabricados.

**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 14 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 utilizado y la orientación de la fibra refuerzo.

**Tabla 14**

*Propiedades mecánicas a flexión de diferentes materiales compuestos y plásticos utilizados en el sector automotriz*

| 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 |
| POLIESTER | - | 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 | 62,40 | 3976 |

***Nota.*** Se designó a cada material un código en función del tipo de material, tipo de material matriz, tipo de fibra refuerzo, tipo de 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 presentados en la tabla 14. Los valores de los diferentes materiales fueron obtenidos de los diferentes trabajos previos realizados que constan en la bibliografía como se muestra en la figura 50.

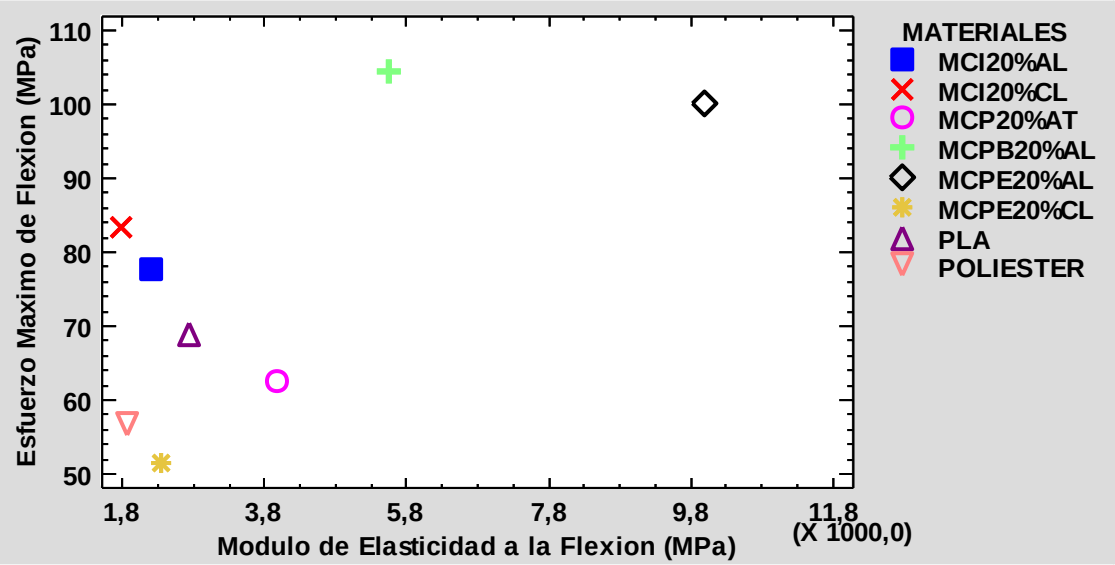



*Figura 50.*Comparación de las propiedades mecánicas a flexión de distintos materiales.

Se puede resaltar que 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 0.020 mm, mientras que las rejillas de aire acondicionado con el material matriz de los compuestos tuvo un desplazamiento nodal de 0.0487 mm, que significa que existe una diferencia entre los desplazamientos nodales de estos dos materiales simulados.

Por otro lado de los análisis estructurales mediante simulación hay que mencionar que las rejillas de aire acondicionado de polipropileno tuvieron un valor de esfuerzo máximo de 0.204 MPa, mientras que las rejillas 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 abacà 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 abacà y cabuya fabricados en nuestro país.

## 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, por lo tanto, en esta propiedad mecánica la presencia de fibras de refuerzo no contribuyó en forma positiva.

La disminución 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 lo cual se pudo constatar mediante las micrografías obtenidas de las probetas de material compuesto posterior a los ensayos de flexión.

Hay que resaltar que 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.

Cabe mencionar que para la fabricación de los materiales compuestos mediante impresión 3D no se utilizó ningún tipo de elemento químico para realizar un pre-mojado de las fibras refuerzo con la finalidad de mejorar la adherencia entre las fibras refuerzo y la matriz, a diferencia de otros procesos de fabricación de materiales compuestos realizados en estudios anteriores.

Los materiales compuestos fabricados mediante impresión 3D presentaron mejores características mecánicas tomando en cuenta el esfuerzo máximo de flexión vs el módulo de elasticidad al ser comparados con otros materiales compuestos fabricados con otro tipo de proceso e inclusive por encima de materiales plásticos utilizados en la industria automotriz.

Hay que resaltar que mediante la simulación computacional de las rejillas de aire acondicionado sometidas a una carga nos permite verificar las diferencias significativas que existe entre estos dos materiales analizados en cuanto al desplazamiento nodal y por otro lado nos permitió verificar que en el análisis de esfuerzo no existe una diferencia significativa entre los materiales simulados.

## RECOMENDACIONES

Se debe tomar en cuenta las propiedades físicas de las fibras refuerzo a utilizar en cuanto al diámetro de las mismas si se va a utilizar impresoras 3D con tecnología PolyJet para fabricar materiales compuestos, ya que la máquina empleada tuvo ciertas dificultades en la manufactura de los compuestos reforzados con fibra de abacá debido a que posee un espesor considerable que no concordaban con los espesores de impresión de cada capa de material matriz.

Se debe considerar la posibilidad de utilizar agentes químicos que ayuden a mejorar el anclaje de las fibras refuerzos a la matriz de los materiales compuestos, de esta manera se puede generar el aumento de las propiedades mecánicas con respecto al material matriz, tomando en cuenta esta característica que se utilizó en otros procesos de fabricación de materiales compuestos en los cuales se obtuvo mejoras considerables de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos estudiados.

Para realizar los ensayos mecánicos se debe garantizar que exista una adecuada fabricación de las probetas a ensayar, tomando en cuenta que durante el experimento en ciertas áreas de las probetas las fibras refuerzos tendieron a acumularse o moverse debido al proceso de fabricación utilizado, lo cual influye directamente en las propiedades mecánicas finales de los materiales compuestos manufacturados.

Se recomienda que se profundice en el área de investigación de la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales mediante impresión 3D ya que es un campo que al Ecuador favorecería en la proyección de empresas que se dediquen a la fabricación de elementos que contengan fibras naturales y tecnología que están tomando fuerza en el campo industrial, para la aplicación en autopartes de vehículos y de esta manera generar fuentes de trabajo y contribuir al cuidado del medio ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

Bledzki, A., Faruk, O. y Sperber, V. (2006). Cars from Bio-Fibres. *Macromolecular Materials and Engineering, 291,* 449 – 457.

Guo, N. y Leu, MC. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and Research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering, 8(3),* 215 – 243.

Faruk, O., Bledzki, A., Fink, H. y Sain, M. (2014). Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering, 299,* 9 – 26.

Li, P. y Huang, S. (2014). Application of Rapid Prototyping Technology in Automobile Manufacturing Industry. *Applied Mechanics and Materials, 553,* 106 – 110.

Ahmad, F., Choi, H. y Park, M. (2015). A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties. *Macromolecular Materials and Engineering, 300,* 10 – 24.

Berchon, M. y Luyt, B. (2016). *La impresión 3D: guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general*. México: Gustavo Gili.

Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana – CINAE. (2017). *Anuario de la industria automotriz ecuatoriana 2017.* Recuperado de http://www.cinae.org.ec/Anuario/anuario2017.pdf

Plan Nacional del Buen Vivir. (2013). *Objetivo 10. Impulsar la transformación de la matriz productiva*. Recuperado de http://www.buenvivir.gob.ec/objetivo-10.-impulsar-la-transformacion-de-la-matriz-productiva

Roshdestwensky, K., Mroginski, J., Morel, C., Barrios, R., Ambra, D. y Podestá, J. (2013). Modelado numérico del comportamiento de la Interface en materiales compuestos. *Mecánica Computacional, 32,* 1653 – 1670.

Centro de Información e inteligencia Comercial – CICO. (2009). *Perfiles de Mercado, perfil de las demás cuerdas y cordajes del genero agave (fibras de cabuya, sisal, etc.)*. Recuperado de http://www.pucesi.edu.ec/pdf/cabuya.pdf

FAO. (2009). Año internacional de las fibras naturales – Abacá. Recuperado de http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/abaca.html

Espinosa, M. (2016, 14 de febrero). Santo Domingo exporta Abacá de calidad. *Revista Lideres.* Recuperado de https://www.revistalideres.ec/lideres/produccion-santodomingo-abaca-exportaciones.html

Guerrero, V. (Ed.). (2016). *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales*. Quito, Ecuador.

Cazón, A., Morer, P. y Matey, L. (2014). PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties. *J Engineering Manufacture, 228(12),* 1664 – 1675.

Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). *Manufacturing engineering and technology.* México: Pearson Education.

Bonada, J., Muguruza, A. y Ramis, X. (2017). Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion radios for photosensitive materials used in Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing, 13,* 762 – 769.

Kruth, J., Leu, M. y Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Cirp Annals*, *47*(2), 525-540.

Stratasys. (2017). PolyJet Technology. Recuperado de http://www.stratasys.com/polyjet-technology

Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D. y Rodríguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal,

tetera (stromanthe stromathoides). *Revista Iberoamericana de Polímeros. 11(7),* 417 – 427.

Quesada, K., Alvarado, P., Sibaja, R. y Vega, J. (2005). Utilización de las fibras del rastrojo de Piña (Ananas comusus, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Revista Iberoamericana de Polímeros. 6(2),* 157 – 179.

Morales, G. (2008). *Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas* (tesis doctoral). Universidad complutense de Madrid, Madrid, España.

Fajardo, J. (2015). *Determinación del estado de orientación de fibras cortas, mediante procesamiento digital de imágenes, en un compuesto termoplástico polipropileno/bambú moldeado por inyección* (tesis de maestría). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

Salvador, M., Amigó, V., Nuez, A., Sahuquillo, O., Llorens, R. y Martí, F. (Junio del 2008). Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticos. In *X-Congreso nacional de Materiales.* Donostia-San Sebastián, España.

Páez, J. (2007). *Obtención de Compuestos de Polipropileno reforzado con fibras de abacà mediante moldeo por compresión* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Callister, W. (2007). *Materials Science and Engineering.* Nueva York, Estados Unidos.

Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* México: International Thomson Editores, S.A.

Biagiotti, J., Puglia, D. y Kenny, J. (2004). A review on Natural Fibre-Based composites – Part I: Structure, Processing and Properties of Vegetable Fibres. *Journal of Natural Fibers. 1(2),* 37 – 68.

Jácome, A. (2015). *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 pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

Tamayo, N. (2012). *Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Contreras, M., Hormaza, W. y Marañón, A. (2009). Fractografìa de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. (1),* 57 – 67.

Ganan, P. y Mondragón, I. (2004). Fique fiber-reinforced polyester composites: Effects of fiber surface treatments on mechanical behavior. *Journal of Materials Science, 39(9),* 3121-3128.

ASTM D-790. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.

Stratasys. (2012). Objet 30 Pro. Recuperado de http://3dmanufacturing.mx/fichas/objet30-pro-ESLA-09-13.pdf.

POL – EKO. (2016). Estufa para secado de fibras. Recuperado de https://www.pol-eko.com.pl/wp-content/uploads/2016/08/SLN-53.jpg.

ASPEX Corporation. (2009). Microscopio Electrónico de Barrido. Recuperado de http://www.sietronics.com.au/acexpress.pdf.

Pontón, P. y Guerreo, V. (2010). Obtención de Materiales Compuestos de Matriz Poliéster reforzados con Fibra de Abacá mediante Estratificación manual. *Revista tecnológica ESPOL, 23(3),* 47 – 54.

Ponce, D. (2011). *Propiedades mecánicas de compuestos biodegradables elaborados a basa de ácido poliláctico reforzados con fibra de abacà* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

# ANEXOS

## Anexo – A

### *Determinación experimental de la densidad de las fibras refuerzos del composite*

**Tabla 1 - A**

*Determinación de la densidad de la fibra de abacá.*

| Muestra | Masa (gr) | V. inicial (cm3) | V. final (cm3) | I. Volumen (cm3) | Densidad (gr/cm3) |
|---|---|---|---|---|---|
| *1* | 2.9 | 80 | 82 | 2 | 1,45 |
| *2* | 5.1 | 80 | 84 | 4 | 1,275 |
| *3* | 6.8 | 80 | 86 | 6 | 1,13 |
| *4* | 8.4 | 80 | 88 | 8 | 1,05 |

La densidad promedio obtenida es de $\boldsymbol{\rho = 1,226\ \frac{gr}{cm^3}}$

**Tabla 2 - A**

*Determinación de la densidad de la fibra de cabuya.*

| Muestra | Masa (gr) | V. inicial (cm3) | V. final (cm3) | I. Volumen (cm3) | Densidad (gr/cm3) |
|---|---|---|---|---|---|
| *1* | 2 | 80 | 83 | 3 | 0.66 |
| *2* | 3.3 | 80 | 85 | 5 | 0.66 |
| *3* | 4.4 | 80 | 86 | 6 | 0.73 |
| *4* | 5.2 | 80 | 89 | 8.5 | 0.61 |

La densidad promedio obtenida es de $\boldsymbol{\rho = 0.665\ \frac{gr}{cm^3}}$

**Anexo - B**

***Determinación de las fracciones volumétricas del material refuerzo***. Para el cálculo de las fracciones volumétricas se tomaron en cuenta los valores obtenidos mediante experimentación de los elementos constitutivos del composite, presentados a continuación para los ensayos de flexión de los casos de estudio establecidos.

$$\rho_m = 1.181\ \frac{gr}{cm^3}$$

$\rho_m = densidad\ de\ la\ matriz$

$$\rho_{fa} = 1.226\ \frac{gr}{cm^3}$$

$\rho_{fa} = densidad\ de\ la\ fibra\ de\ abac$à

$$\rho_{fc} = 0.665\ \frac{gr}{cm^3}$$

$$\rho_{fc} = densidad\ de\ la\ fibra\ de\ cabuya$$

**Probetas para ensayos de Flexión**

*Caso 1. Calculo de la fracción volumétrica de refuerzo de cabuya con el 20%*

La densidad de la probeta con el refuerzo de cabuya se determinó por el método gravimétrico, en primera instancia se pesó la probeta y se obtuvo un valor de 8.6224 gr; luego se introdujo en una probeta con agua destilada y se verifico el incremento de volumen el cual fue de 8 $cm^3$; luego de ello se calculó la densidad del compuesto con la Ecuación 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$\rho =$ Densidad de la fibra

$m =$ Masa de la fibra

$V =$ Volumen

Obteniendo como resultado

$$\rho_c = 1.0778 \ \frac{gr}{cm^3}$$

Con este valor obtenido se procede a calcular la fracción volumétrica del refuerzo presente en el elemento aplicando la Ecuación 2.

$$\rho_c = f_m * \rho_m + f_f * \rho_f \quad (2)$$

Tomando en cuenta:

$$f_m = 1 - f_f \quad (3)$$

$$\rho_c = (1 - f_f) * \rho_m + f_f * \rho_f$$

$$1.0778 \ \frac{gr}{cm^3} = (1 - f_f) * 1.181 \ \frac{gr}{cm^3} + f_f * 0.665 \ \frac{gr}{cm^3}$$

$$1.0778 \ \frac{gr}{cm^3} = 1.181 \ \frac{gr}{cm^3} - 1.181 \frac{gr}{cm^3} * f_f + 0.665 \ \frac{gr}{cm^3} * f_f$$

$$1.0778 \ \frac{gr}{cm^3} - 1.181 \frac{gr}{cm^3} = -1.181 \ \frac{gr}{cm^3} * f_f + 0.665 \ \frac{gr}{cm^3} * f_f$$

$$-0.1032 \ \frac{gr}{cm^3} = -0.516 \ \frac{gr}{cm^3} * f_f$$

$$f_f = \frac{-0.1032 \ \frac{gr}{cm^3}}{-0.516 \ \frac{gr}{cm^3}}$$

$$\boldsymbol{f_f = 0.2 * 100}$$

$$\boldsymbol{f_f = 20\%}$$

*Caso 2. Calculo de la fracción volumétrica de refuerzo de abacá con el 20%*

La densidad de la probeta con el refuerzo de abacá se determinó por el método gravimétrico, en primera instancia se pesó la probeta y se obtuvo un valor de 9.52 gr; luego se introdujo en una probeta con agua destilada y se verifico el incremento de volumen el cual fue de 8 $cm^3$; luego de ello se calculó la densidad del compuesto con la Ecuación 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1}$$

$\rho =$ Densidad de la fibra

$m =$ Masa de la fibra

$V =$ Volumen

Obteniendo como resultado

$$\rho_c = 1.19 \ \frac{gr}{cm^3}$$

Con este valor obtenido se procede a calcular la fracción volumétrica del refuerzo presente en el elemento aplicando la Ecuación 2.

$$\rho_c = f_m * \rho_m + f_f * \rho_f \tag{2}$$

Tomando en cuenta:

$$f_m = 1 - f_f \tag{3}$$

$$\rho_c = (1 - f_f) * \rho_m + f_f * \rho_f$$

$$1.19 \ \frac{gr}{cm^3} = (1 - f_f) * 1.181 \ \frac{gr}{cm^3} + f_f * 1.226 \ \frac{gr}{cm^3}$$

$$1.19 \ \frac{gr}{cm^3} = 1.181 \ \frac{gr}{cm^3} - 1.181 \frac{gr}{cm^3} * f_f + 1.226 \ \frac{gr}{cm^3} * f_f$$

$$1.19 \ \frac{gr}{cm^3} - 1.181 \frac{gr}{cm^3} = -1.181 \ \frac{gr}{cm^3} * f_f + 1.226 \ \frac{gr}{cm^3} * f_f$$

$$0.009\ \frac{gr}{cm^3} = 0.045\ \frac{gr}{cm^3} * f_f$$

$$f_f = \frac{0.009\ \frac{gr}{cm^3}}{0.045\ \frac{gr}{cm^3}}$$

$$\boldsymbol{f_f = 0.20 * 100}$$

$$\boldsymbol{f_f = 20\%}$$