

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**ESTUDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIAL
COMPUESTO A BASE DE FIBRA DE BAMBÚ PARA ACLARACIONES
AERONÁUTICAS UTILIZANDO MANUFACTURA ADITIVA**

POR

JULY ANDREA TABORDA RIOS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
AERONÁUTICA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

ABRIL, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIAL
COMPUESTO A BASE DE FIBRA DE BAMBÚ PARA ACLARACIONES
AERONÁUTICAS UTILIZANDO MANUFACTURA ADITIVA**

**POR
JULY ANDREA TABORDA RIOS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
AERONÁUTICA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

**DIRECTOR DE TESIS
DRA. PATRICIA DEL CARMEN ZAMBRANO ROBLEDO**

**COASESORES
DR. OMAR EDUARDO LÓPEZ BOTELLO
DR. CARLOS GARZA RODRÍGUEZ**

ABRIL, 2019



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis titulado “Estudio de propiedades mecánicas de material compuesto a base de fibra de bambú para aplicaciones aeronáuticas utilizando manufactura aditiva” realizada por la alumna July Andrea Taborda Rios con número de matrícula 1887261, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Aeronáutica con orientación en materiales.

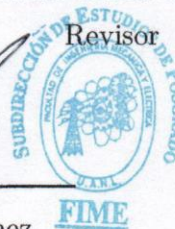
El Comité de Tesis

Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo
Directora

Dr. Omar Eduardo López Botello
Revisor

Dr. Carlos Garza Rodríguez
Revisor

Dr. Simón Martínez Martínez.
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Abril, 2019

ABSTRACT

Industries, such as aerospace, naval and automotive, have strengthened the production of composite materials due to their manufacturing versatility and outstanding mechanical behavior. Commonly, polymer matrices are reinforced with carbon, aramid or glass fibers, among others, which provide a favorable strength/weight ratio. However, considering the high cost of raw materials, high energy consumption and the considerable use of water resources, production challenges are yet to be solved. For this reason, a great deal of research work has been focused in producing new composite materials using natural fibers as an alternative, nevertheless mostly using traditional manufacturing processes. In this work, Additive Manufacturing (AM) is used as an alternative for the production of new composites using sustainable raw materials, which are economic, non-toxic, renewable and environment - friendly. This research studies the mechanical behavior of a composite material based on a polylactic acid resin (PLA) reinforced with bamboo fibers. The specimens, which were manufactured considering a design of experiments, were subjected to mechanical tensile testing in accordance with ASTM standards. Furthermore, the adhesion between the matrix and the fibers was analyzed using scanning electron microscopy (SEM).

KEYWORDS: Bamboo fibers, natural fibers, composite materials, Additive manufacturing.

RESUMEN

Industrias como la industria aeroespacial, naval y automotriz, han fortalecido la producción de materiales compuestos MC debido a su versatilidad de fabricación y su excelente comportamiento mecánico. Comúnmente, las matrices de polímeros están reforzadas con fibras de carbono, aramida o vidrio, entre otras, que proporcionan una relación resistencia / peso favorable. Sin embargo, teniendo en cuenta el alto costo de las materias primas, el alto consumo de energía y el uso considerable de los recursos hídricos, los desafíos de la producción aún no se han resuelto. Por este motivo, una gran parte del trabajo de investigación se ha centrado en producir nuevos MC que utilizan fibras naturales como alternativa, pero en su mayoría utilizan procesos de fabricación tradicionales. En este trabajo, Manufactura Aditiva (AM, por sus siglas en inglés) se utiliza como alternativa para la producción de nuevos MC que utilizan materias primas sostenibles, que son económicas, no tóxicas, renovables y respetuosas con el medio ambiente. Esta investigación estudia el comportamiento mecánico de un material compuesto basado en una resina de ácido poliláctico (PLA) reforzada con fibras de bambú. Las muestras manufacturadas a través del diseño de experimentos se sometieron a ensayo mecánico a tracción, de acuerdo con los estándares de la norma ASTM. Para determinar la adhesión entre la matriz y las fibras, se usó microscopía electrónica de barrido (SEM).

PALABRAS CLAVE: Fibras de bambú, fibras naturales, MC, Fabricación de aditivos.

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido conocer este hermoso País y haberme brindado salud para lograr mis objetivos, además de su infinito amor y misericordia.

A mi familia,

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan, por apoyarme en todo momento, por sus consejos, valores y por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi compañero de vida,

Tu ayuda ha sido fundamental en mi vida, has estado incluso en los momentos más difíciles, brindándome comprensión, tolerancia, apoyo y motivación. Te lo agradezco mi amor.

A mis amigos VCL,

A ustedes por todos los momentos que hemos compartido, por su apoyo incondicional en cada experiencia de mi vida y por la fortaleza que me han brindado puedo llamarlos humanos de corazón.

AGRADECIMIENTOS

La Universidad Autónoma de Nuevo León. Por brindar la oportunidad de formarme en tan prestigiosa institución. A las personas que directa o indirectamente aportaron en todo mi proceso académico gracias.

La Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo por su dedicación, orientación y acompañamiento que me brindó en este proceso y apoyo en mis experiencias de vida.

El Dr. Omar Eduardo López Botello por sus consejos, conocimientos, apoyo y tiempo brindado para lograr culminar mi proyecto.

El Dr. Carlos Garza Rodríguez por su tiempo y comprensión durante todo este proceso.

A todos los integrantes del Laboratorio de manufactura avanzada del Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA), especialmente al futuro Ingeniero mecatrónico Edgar Ulises Rojo Rodríguez, por su valioso aporte y apoyo durante el proceso experimental.

Al Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas (CENTA), por la oportunidad y apoyo en la realización del ensayo a tracción en sus instalaciones.

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo del Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECyT) de CONACYT mediante el proyecto Fortalecimiento de la Aeronáutica en el Noreste de México.

Al Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADIT), por su apoyo durante la elaboración de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

ABSTRACT.....	IV
RESUMEN.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTOS.....	VII
TABLA DE CONTENIDO.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABLAS.....	XIV
CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Pregunta de investigación.....	4
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 Estructura y contenido del proyecto.....	5
CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Generalidades de los MC.....	7
2.1.1 Clasificación de los MC.....	8
2.1.1.3 MC de matriz polimérica (CMP).....	8
2.1.2 Material compuesto según su refuerzo.....	10
2.1.3 Fabricación de MC.....	12
2.1.4 MC utilizados en la industria aeronáutica.....	13
2.1.5 MC con impacto ambiental.....	17
2.2 Fibras utilizadas como refuerzo.....	18
2.2.1 Fibras sintéticas.....	21
2.2.2 Fibras naturales (celulosa/lignocelulosa).....	21
2.3 Antecedentes de investigaciones de MC usando fibra de bambú como refuerzo en un PLA.....	24
2.4 Tecnologías de manufactura aditiva en MC.....	26

2.4.1 Modelado por deposición fundida (MDF por sus siglas en inglés).....	28
2.4.2 MC utilizados en MDF.	28
2.4.3 Aplicaciones de la Manufactura Aditiva de compuestos en aeronáutica.	34
CAPÍTULO 3 : PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	36
3.1 Selección de material.....	36
3.2 Diseño de experimentos planteado.....	37
3.3 Parámetros previos a la fabricación de las probetas.	39
3.4 Manufactura aditiva de probetas.....	41
3.4.1 Dimensiones de las probetas.	41
3.4.2 Filamento Bamboofill.....	42
3.4.3 Manufacturación de probetas.....	42
3.5 Preparación de las muestras.....	44
3.5.1 Etiquetación de las probetas.....	44
3.5.2 Mediciones previas a ensayos.....	45
3.6 Procedimiento de los ensayos mecánicos.....	46
3.6.1 Ensayo a tracción.....	46
CAPÍTULO 4 : RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
4.1 Respuesta de salida del diseño de experimentos	48
4.2 Comportamiento en tracción.....	57
4.2.1 Comportamiento mecánico en tensión.	58
4.2.2 Esfuerzo último de tensión.....	59
4.2.3 Módulo elástico	60
4.2.4 Deformación máxima.	61
4.3 Microscopia de barrido SEM.....	65
CAPÍTULO 5 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
5.1 Conclusiones.....	71
5.2 Recomendaciones.....	74
REFERENCIAS.....	75
ANEXOS.....	82
Anexo A: Propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales.....	82
Anexo B: Propiedades mecánicas a tensión de las diferentes combinaciones	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. (a) Compuesto reforzado con partículas. (b) Compuesto reforzado con fibras, el cual es un compuesto laminado (la matriz se forma apilando láminas) unidireccional (las fibras están orientadas en este caso en una sola dirección) [12].	7
Figura 2.2. Clasificación de tipo de refuerzos en MC [17].	10
Figura 2.3. Ejemplos de tipo de refuerzos a) Matriz reforzada con material particulado, b) refuerzos de alambres, fibras y whisker y c) Estructura de un material compuesto laminado [18].	11
Figura 2.4. Empleo de MC en un Boeing 787 de última generación [25].	16
Figura 2.5. Principal aplicación de los MC de matriz polimérica con refuerzo de fibras vegetales [25].	16
Figura 2.6. Clasificación de polímeros biodegradables [5].	18
Figura 2.7. Uso de compuestos poliméricos reforzados con fibra en Airbus 380 [28].	19
Figura 2.8. Uso de compuestos poliméricos reforzados con fibra en Boeing 777 [28].	19
Figura 2.9. Clasificación de fibras naturales y sintéticas [29].	20
Figura 2.10. Energía requerida para la producción de algunas fibras [31].	24
Figura 2.11. Costo en dólares por Kg de fibras naturales según literatura [27].	24

Figura 2.12. Proceso de manufactura aditiva [10].	27
Figura 2.13. Diagrama del proceso de modelado por deposición fundida [44].	28
Figura 2.14. Descripción grafica del Proceso MDF en MC.	31
Figura 2.15. Proceso de extrusor marca Filabot® [57].	31
Figura 2.16. Carenado aerodinámico (Derecha) moldeo y (izquierda) a través de MA de compuesto ULTEM 1010 a alta temperatura [47].	34
Figura 2.17. Aplicaciones de material polimérico utilizando MA en diferentes piezas de una aeronave [67].	35
Figura 3.1. Ciclo 100% biodegradable del filamento a estudiar.	37
Figura 3.2. Print core y muestra realizadas que permitieron elegir parámetros de manufacturación.	40
Figura 3.3. Combinaciones del diseño de experimentos manufacturadas.	40
Figura 3.4. Dimensiones finales de la probeta de ensayo a tracción en unidades de mm [70].	41
Figura 3.5 Filamento usado para el estudio.	42
Figura 3.6. Impresora 3D Ultimaker 3 extended.	42
Figura 3.7. Programa cura [71].	43
Figura 3.8. Ejemplo de muestras elaboradas.	43
Figura 3.9. Etiqueta de probeta	44

Figura 3.10. Equipos utilizados en la medida de espesor y ancho de las probetas a analizar	45
Figura 3.11. Máquina de ensayo mecánico y extensómetro.....	47
Figura 4.1. Efectos principales para relación de señal ruido en la media de los datos para esfuerzo.....	52
Figura 4.2. Efectos principales para relación de señal ruido en la media de los datos para módulo de Young.	53
Figura 4.3. Efectos principales para relación de señal ruido en la media de los datos para deformación.	55
Figura 4.4. Gráfica de superficie con la geometría cúbica fija para resultados de salida de esfuerzo.....	56
Figura 4.5. Gráfica de superficie con la geometría cúbica fija para respuesta de salida de módulo de Young.....	56
Figura 4.6. Gráfica de superficie con la geometría zigzag fija para respuesta de salida de deformación.	56
Figura 4.7. Curva promedio Esfuerzo vs Deformación de los compuestos PLA reforzado con fibras de bambú.	58
Figura 4.8. Esfuerzo Máximo promedio	59
Figura 4.9. Módulo de Young promedio.....	61
Figura 4.10. Deformación máxima promedio	62
Figura 4.11. a) Orientaciones de construcción de las probetas y b) las curvas de esfuerzo - deformación resultantes.....	64

Figura 4.12. Direccion y orientacion de fibra.....	66
Figura 4.13. Deslizamiento de las fibras.....	67
Figura 4.14. Espacio entre la matriz el material de refuerzo.	67
Figura 4.16. Grietas en el material.....	68
Figura 4.17. Poros en el material.	69
Figura 4.18. Deslizamiento de capa en el material.....	70
Figura 4.19. Adhesion entre capa en el material.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas de fibras naturales [2].	2
Tabla 1.2. Diseño de experimentos.	4
Tabla 2.1. Procedimientos de fabricación para productos plásticos reforzados con fibras [19].	12
Tabla 2.2. Aplicaciones tempranas de polímeros reforzados con fibra en aviones comerciales Recientemente, los MC de polímeros reforzados con fibra (FRPs) [20].	15
Tabla 2.3. Fibras reforzando termoplásticos [64].	33
Tabla 3.1. Propiedades mecánicas del biopolímero PLA [69].	37
Tabla 3.2. Factores y niveles elegidos en esta investigación con su respectiva justificación.	38
Tabla 3.3. Combinaciones para el diseño de experimentos.	39
Tabla 3.4. Etiquetas de las probetas elaboradas.	44
Tabla 4.1 Datos de diseño de experimentos con resultado de ensayo a tracción. .	49
Tabla 4.2. Respuesta del diseño para relaciones SN en esfuerzo.	50
Tabla 4.3. Respuesta del diseño para relaciones SN en Módulo de Young.	50
Tabla 4.4. Respuesta del diseño para relaciones SN en deformación	50

Tabla 4.5. Análisis de varianza del diseño para esfuerzo	51
Tabla 4.6. Análisis de varianza del diseño para módulo de Young.....	51
Tabla 4.7. Análisis de varianza del diseño para deformación.....	51
Tabla 4.8. Ecuación de regresión lineal para esfuerzo.....	57
Tabla 4.9. Ecuación de regresión lineal para módulo de Young	57
Tabla 4.10. Ecuación de regresión lineal para deformación	57
Tabla A.1. Propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales [27].....	82
Tabla A.2. Propiedades mecánicas de las combinaciones 1 hasta 4.....	83
Tabla A.3. Propiedades mecánicas de las combinaciones 5 hasta 8.....	84
Tabla A.4. Propiedades mecánicas de la combinación 9.	85

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Industrias como la automotriz, aeroespacial y de construcción han mostrado interés especial en el desarrollo de nuevos MC, esto debido a su versatilidad de fabricación y especialmente al alto costo de producción de materiales tradicionales [1].

Los MC basados en fibras de carbono, vidrio, aramida, polietileno de alto módulo y fibras de boro, han desempeñado un papel importante en la industria aeronáutica, proporcionando buenas propiedades físicas, tales como peso ligero, alta relación resistencia/peso y estabilidad térmica. Sin embargo, enfocándose en el área de producción de los materiales sintéticos, es evidente el alto costo de materias primas, residuos tóxicos, problemas de salud, elevado consumo de energía y recursos hídricos, anexo a esto, al final del ciclo de vida de estos materiales convencionales se presenta una nueva problemática debido a que no son renovables, reciclables y/o biodegradables, lo que presenta un grave problema ambiental, económico y social; por ejemplo, para las palas de aerogeneradores fuera de servicio, el vertedero sigue siendo la opción más económica, pero las directivas de gestión de residuos son cada vez más estrictas y limitarán este enfoque en un futuro próximo [2].

Las fibras naturales poseen ventajas en su uso, tales como baja densidad y propiedades mecánicas relativamente altas, es decir, módulo y resistencia específica. Recientemente, las fibras naturales se han vuelto atractivas para los investigadores como un refuerzo alternativo para el polímero reforzado con fibra [3]. Además estas fibras poseen las características de ser renovables y biodegradables [4].

Las fibras naturales se subdividen en función de sus orígenes, provenientes de plantas, animales o minerales. Las fibras de plantas están compuestas de celulosa,

las fibras animales están formadas por proteínas (cabello, seda y lana) [5], mientras que las minerales son combinaciones elaboradas por los seres humanos.

Las fibras vegetales se pueden considerar compuestos naturales que consisten principalmente en fibrillas de celulosa incrustadas en la matriz de lignina. Las fibrillas de celulosa se alinean a lo largo de la longitud de la fibra, lo que proporciona una mejor resistencia a la tracción, flexión y adicionalmente proporciona rigidez [5]. Existen diversas investigaciones que estudian las fibras naturales como refuerzo de matrices poliméricas tales como el kenaf, el bambú, el bonote y el sisal; estas han demostrado ser materiales de alta resistencia en la industria aeroespacial y automotriz [6], además brindan ventajas en la salud pues estas no son cancerígenas y son seguras durante el procesamiento y la manipulación [7].

Diferentes autores se han enfocado en el estudio del comportamiento mecánico de MC reforzados con fibras naturales debido a sus propiedades mecánicas, tal como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas de fibras naturales [2].

Tipo de fibra	Densidad [g/cm ³]	Resistencia a tracción MPa	Módulo a tracción GPa
Bambú	0.59-1.10	140-1200	12-32
Sisal	1.00-1.50	80-855	9-38
Cañamo	1.18-1.60	310-110	3-90
Lino	1.30-1.58	343-1500	8-160
Yute	1.43-1.52	187-800	3-64
Kenaf	1.20-1.40	180-1191	14-128

Entre estas fibras naturales se ha destacado un fuerte interés en la fibra de bambú, debido a sus características mecánicas y baja densidad. También un recuento hasta al año 2000 reconoce un total de 90 géneros y unas 1 040 especies de bambúes en el mundo, que se distribuyen desde los 46° de latitud norte hasta los 47° de latitud sur, y desde el nivel del mar hasta los 4 000 metros de altura en los Andes ecuatoriales [8]. México tiene ocho géneros y 35 especies de bambúes leñosos y tres géneros con cuatro especies de bambú herbáceo [8], De acuerdo a los anterior,

diversos investigadores se han enfocado en esta planta debido a su sostenibilidad y propiedades mecánicas que brinda.

Existe un gran número de investigaciones sobre compuestos estructurales verdes, se ha llevado a cabo una investigación limitada sobre la metodología de fabricación más apropiada para desarrollar un material estructural a nivel industrial [2]. La manufactura aditiva (MA) es una alternativa para la creación de nuevos materiales con materias primas sostenibles, de baja densidad, económico, no tóxicos, renovables y ambientalmente responsable.

Las tecnologías de MA permiten construir una amplia gama de componentes funcionales con geometrías complejas que pueden ser difíciles, o incluso imposibles de lograr, utilizando métodos convencionales [9]. La MA comúnmente conocida como impresión en 3D, ha despertado un interés creciente por parte de la industria, así como de las comunidades académicas y de investigación [10], debido a la gran capacidad de diseño que se puede lograr sin un costo adicional al componente final, esto es una gran beneficio, ya que en todas las técnicas de fabricación convencionales existe un vínculo directo con el costo de un componente a la complejidad de su diseño [11].

Este proyecto titulado “Estudio de propiedades mecánicas de material compuesto a base de fibra de bambú para aplicaciones aeronáuticas utilizando manufactura aditiva”, se ha enfocado a estudiar las propiedades mecánicas de tracción de un material compuesto entre un matriz de ácido poliláctico con un 20% de fibra de bambú, elaborada mediante la manufactura aditiva para aplicación en la industria aeronáutica, Las probetas se elaboraron mediante un diseño de experimentos de Taguchi como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Diseño de experimentos

Factores	Niveles		
	1	2	3
Geometría	Grid	Cúbica	Zigzag
Altura de capa mm	0,1	0,15	0,2
Relleno %	50%	75%	100%

1.2 Pregunta de investigación

¿Qué propiedades mecánicas debe tener un material compuesto de matriz de ácido poliláctico con un refuerzo de 20% de fibra de bambú elaborado mediante manufactura aditiva, como una alternativa tecnológica en la industria aeronáutica?

1.3 Hipótesis

El uso de la manufactura aditiva a través de la técnica modelado por deposición fundida en la síntesis de un material compuesto de matriz de ácido poliláctico con un refuerzo de 20% de fibra de bambú permite obtener mejores propiedades mecánicas que la matriz sin reforzar.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

Estudiar las propiedades mecánicas a tracción de la matriz de ácido poliláctico con un refuerzo de 20% de fibra de bambú.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Establecer una metodología para la preparación de diferentes probetas mediante el diseño de experimentos de una matriz de ácido poliláctico con un refuerzo de 20% de fibra de bambú.

- Reunir y analizar información secundaria relacionada con la caracterización de las fibras de bambú.
- Realizar los ensayos para determinar propiedad mecánica tal como módulo de elasticidad y resistencia a tracción, para cada una de las probetas manufacturadas.
- Comparar y discutir los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de los MC evaluados: matriz de ácido poliláctico con un refuerzo de 20% de fibra de bambú.

1.5 Estructura y contenido del proyecto

A continuación, se muestra la estructura que se llevara a cabo durante la evaluación de este proyecto el cual se compone por 5 capítulos, cuyo contenido se describe a continuación.

El Capítulo 1 (Presentación del proyecto) describió el tema de tesis, partiendo del estado actual de diferentes industrias y su interés en la implementación de nuevos MC, enfatizando en el alto costo de materias primas y la disposición final de las piezas fabricadas con materiales sintéticos. Evidenciando la importancia de establecer materiales sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

El Capítulo 2 (Marco teórico de la investigación), muestra una revisión bibliográfica de los temas principales sobre los que se fundamenta la propuesta metodológica, inicialmente se habla de los MC, clasificación y usos en la industria aeronáutica. Centrándose exclusivamente a los MC de matriz termoplásticas reforzados con fibras naturales manufacturados aditivamente a través de la técnica de Modelación por deposición fundida (MDF siglas en ingles) y diferentes aplicaciones de matriz termoplásticas en pieza de interiores en diferentes aeronaves.

El capítulo 3 (Procedimiento experimental), explica paso a paso la metodología llevada, se aborda el tema de selección del material donde se explica los parámetros utilizados y las propiedades mecánicas de la matriz y la fibra de bambú. Se pasa al diseño de experimentos y las combinaciones que se realizaron fue un total de 9. Las muestras fueron elaboradas y sometidas a ensayo de tracción de acuerdo con la norma estándar ASTM D638, por último, se realizó el análisis de fractografía mediante el microscopio de barrido SEM.

Posteriormente en el capítulo 4 (análisis y resultados) se detallan los resultados obtenidos durante el ensayo mecánico, diseño de experimentos a través del software estadístico y el análisis fractográfico establecido en el Capítulo 3

Capítulo 5 (conclusiones y recomendaciones) de la tesis, aportaciones para futuros estudios en la misma línea investigación.

Finalmente se encuentra las referencias y anexos utilizadas para realización del presente proyecto.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades de los MC

Los MC son conformados, en una escala macroscópica, por dos o más materiales (llamados fases o constituyentes), los cuales se unen de maneras y en proporciones adecuadas para formar un nuevo material con mejores propiedades a las de los constituyentes. Los MC aprovechan las propiedades de cada uno de éstos de tal manera que pueden lograrse combinaciones de propiedades que son difíciles de obtener en materiales convencionales. Por ejemplo, alta relación resistencia-densidad o rigidez-densidad [12].

En los MC es posible identificar dos fases: una constituida por la matriz, y otra fase denominada refuerzo. Los componentes de un material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente unos con otros. La identificación de los materiales y la interface debe ser posible de distinguir por medios físicos [13]. La Figura 2.1 muestra un esquema de un material compuesto.

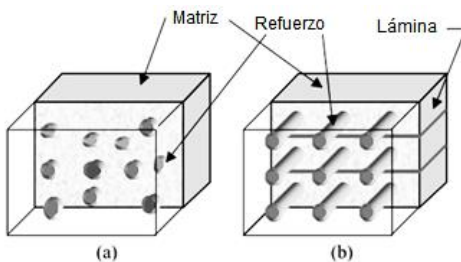


Figura 2.1. (a) Compuesto reforzado con partículas. (b) Compuesto reforzado con fibras, el cual es un compuesto laminado (la matriz se forma apilando láminas) unidireccional (las fibras están orientadas en este caso en una sola dirección) [12].

2.1.1 Clasificación de los MC.

Los MC pueden ser clasificados en tres grandes grupos de acuerdo con el material que constituye la matriz: compuesto de matriz metálica (CMM), compuesto de matriz cerámica (CMC) y compuesto de matriz polimérica (CMP) que serán descritos a continuación.

2.1.1.1 Los MC de matriz metálica (CMM).

Estos MC han sido desarrollados principalmente para componentes aeroespaciales y de motores de automoción. Poseen alta resistencia y muy bajo peso. Se clasifican en tres grandes grupos, de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado: reforzado con fibras continuas, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con partículas. Como ejemplos de MC de matriz metálica se tienen las aleaciones de aluminio como refuerzo de fibras de boro, aleaciones de aluminio reforzado con partículas de aluminio y carburo de silicio, etc. [3].

2.1.1.2 MC de matriz cerámica (CMC).

Son más recientes y tienen mejores propiedades mecánicas, como resistencia y tenacidad, que materiales cerámicos tradicionales, especialmente en rangos de bajas temperaturas. También se clasifican de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado: con fibras continuas, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con partículas. Las principales fibras de refuerzo que se combinan con las matrices cerámicas son las de carbono de silicio y las de óxido de aluminio, y en el caso de fibras discontinuas y partículas se utilizan como refuerzos agujas cerámicas de carburo de silicio [14].

2.1.1.3 MC de matriz polimérica (CMP)

Los CMP utilizan materiales de origen polimérico como fase continua. Los polímeros comprenden materiales que van desde los plásticos comunes hasta el caucho. Se tratan de compuestos orgánicos, basados en el carbono, hidrogeno y otros elementos no metálicos, caracterizados por la gran longitud de las estructuras moleculares [4]. Los polímeros están constituidos por la unión de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros los cuales se entrelazan entre si formando una especie

de red tridimensional, estos materiales se han desarrollado rápidamente y son aplicados en diferentes áreas en la industria.

Los polímeros tienen una gran versatilidad para su fabricación, son livianos, en general económicos y presentan propiedades mecánicas apropiadas para un extenso número de aplicaciones. Se usan diferentes clases de refuerzos, ya sean en forma de fibras o partículas [15]. Estos materiales pueden clasificarse de acuerdo con su comportamiento térmico y mecánico en tres grandes grupos: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Los termoestables poseen una estructura molecular que forma una red tridimensional espacial, entrelazada con fuertes enlaces covalentes que generan un aspecto de una única molécula, esto se le atribuye a su estructura reticulada, lo que conlleva a que estos materiales tengan mejores propiedades mecánicas, térmicas, resistencia química, resistencia eléctrica y estabilidad dimensional. Los termofijos cuando completan su grado de polimerización o curado, la forma de la pieza se conserva de manera permanente e irreversible, es decir si se les incrementa la temperatura de curado especificada por el fabricante, tienen una tendencia a degradarse, carbonizarse y a quemarse.

Los polímeros termoplásticos tienen la característica que una vez polimerizados pueden ablandarse o derretirse con calor para cambiar su forma (estos procesos son reversibles y pueden repetirse). Este procedimiento no afecta excesivamente sus propiedades, lo cual los hace muy prácticos para ser reutilizados [15].

Los elastómeros son capaces de soportar deformaciones muy grandes recuperando su forma inicial una vez que se elimina el esfuerzo. En los elastómeros, suele producirse un entrecruzamiento parcial de las cadenas para evitar que cada vez que estos materiales se ven sometidos a un esfuerzo, las moléculas se deslicen unas sobre otras, lo que provocaría deformaciones irreversibles [16]. En ensayos de tracción, la relación entre la longitud final de una probeta y la inicial puede llegar a ser del orden de 300-800 %, sin que se produzca la rotura y sin que aparezca deformaciones permanentes una vez terminado el ensayo [15].

2.1.2 Material compuesto según su refuerzo.

Existen tres grupos según el tipo de refuerzo a utilizar en la manufactura de los MC que intervienen en las propiedades geométricas y en su distribución donde intervienen las propiedades geométricas del refuerzo, distribución, porcentaje (fibra/matriz) y la interfaz entre los materiales que componen la muestra final. En la Figura 2.2 se muestra un esquema representativo de la clasificación el tipo de refuerzo en MC.

Los MC reforzados con partículas se subdividen en reforzados con partículas grandes y endurecidos por dispersión. Estos materiales reforzados por partículas son de interés debido a su facilidad de procesamiento, sus propiedades mecánicas serán isotrópicas si las partículas están debidamente dispersas, este tipo de reforzamiento es el más común en los compuestos de matriz metálica. Estos compuestos se dividen en: reforzados por partículas grandes y reforzados por partículas dispersas.

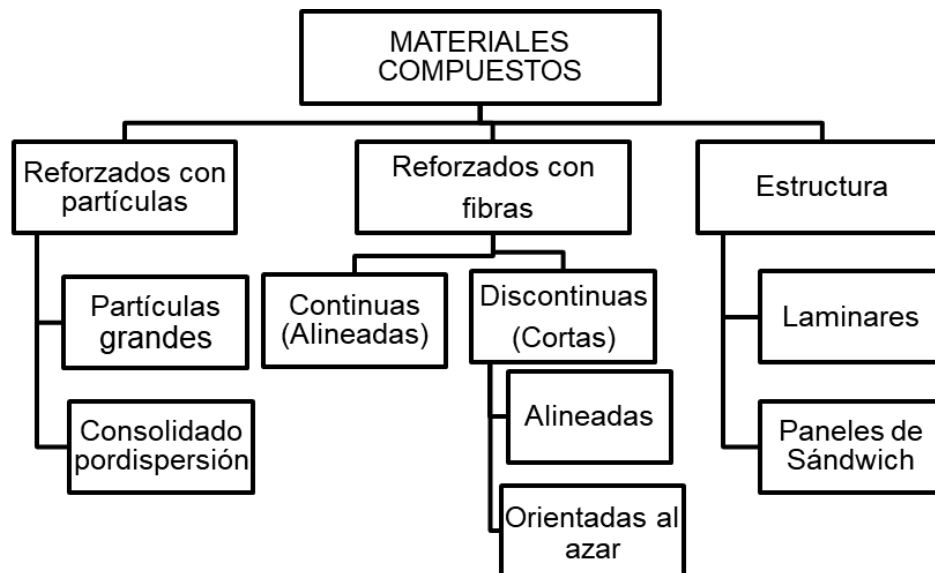


Figura 2.2. Clasificación de tipo de refuerzos en MC [17].

La diferencia se encuentra en el mecanismo de reforzamiento; el término grande en el primer tipo de refuerzo hace referencia a que el tamaño de la partícula es tan grande que la cohesión entre la matriz y el refuerzo no se explica a nivel atómico,

los plásticos con cargas grandes son compuestos de este tipo. Otro ejemplo es el concreto polimérico, Figura 2.3a, el cual consiste en un polímero termofijo como matriz y partículas rígidas de sílice como refuerzo [18].

Los refuerzos estructurales están subdivididos en dos grupos los laminares y paneles de sándwich, este tipo de compuestos poseen características mecánicas que dependerán tanto de la geometría de las estructuras como de los materiales que constituyen la pieza elaborada.

Los compuestos reforzados con fibras (CRF) no tienen una clara ventaja, particularmente cuando se observa que su alargamiento de rotura es mucho menor que los metales con resistencia comparable [19]. Sin embargo, este tipo de compuestos son importantes desde el punto de vista tecnológico. El objetivo de los CRF es conseguir materiales con una elevada resistencia a la fatiga y rigidez, a bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad, por lo que se pretende conseguir una mejor relación resistencia/peso [18], es decir encontrar una mejora en la resistencia y rigidez a bajas densidades lo cual es posible conseguir estas características se expresan mediante los parámetros de resistencia específica y módulo específico.

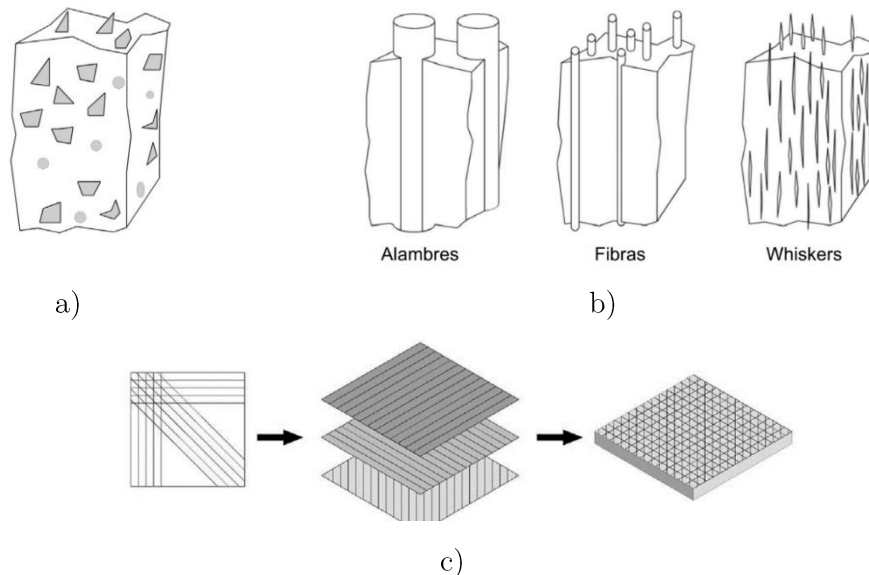


Figura 2.3. Ejemplos de tipo de refuerzos a) Matriz reforzada con material particulado, b) refuerzos de alambres, fibras y whisker y c) Estructura de un material compuesto laminado [18].

2.1.3 Fabricación de MC.

La conformación por procesos de moldeo varía según la naturaleza de la pieza, el número de piezas y el costo. El material del molde puede estar hecho de metal, polímero, madera o yeso [20]. Y también, existen diferentes procesos de fabricación de MC de matrices poliméricas reforzadas con fibras que se subdividen de procesos de molde abierto y de molde cerrado como se muestra en la Tabla 2.1 donde se realiza un breve resumen para aplicación de cada una de las técnicas.

Tabla 2.1. Procedimientos de fabricación para productos plásticos reforzados con fibras [19]

Procedimiento	Resumen de los métodos de proceso y fabricación
Procesos en molde abierto	
Método de contacto manual (Hand lay-up)	Se colocan sobre el molde diferentes tejidos de fibras, se impregnan con resina a brocha y pasando un rodillo. Se ponen capas hasta que se llegue al espesor de diseño. El moldeo cura sin calor ni presión.
Proyección (Spray-up)	Se proyectan simultáneamente hilos cortados y resina a un molde preparado y se pasa el rodillo antes de que la resina endurezca.
Saco de vacío, Saco de presión, autoclave	Se pre-impregnan capas de fibras, normalmente capas unidireccionales, con resinas y se curan parcialmente. Las capas pre-impregnadas se colocan en la superficie del molde con orientaciones determinadas, se cubren con un saco flexible, y se consolidan usando vacío o de presión en autoclave en la temperatura de curado requerida.
Arrollamiento de filamentos	A las fibras continuas se les realiza un baño de resina y se enrollan después, usando una máquina controlada por programa sobre un mandril con ánulo preestablecidos. La resina cura parcial o totalmente antes de sacar el componente, normalmente un tubo, del mandril.
Moldeo de centrifugación	Se introducen mezclas de fibras y resina en un molde rotatorio y se dejan curar in situ.
Procesos con molde cerrado	
Moldeo por compresión en caliente	Las matrices o útiles, calientes y acoplados, se cargan con materia prima (compuestos de hojas continuas SMC, Premix o pasta DMC, tejido o pre-impregnado unidireccional) y se comprimen para que se adapten a la cavidad y curen.
Moldeo por inyección Moldeo de transgénica	Se inyectan polímeros fundidos o en estado plástico mezclados con fibras cortas, normalmente a alta presión, en la cavidad de un molde ranurado y se deja solidificar o curar.
Pultrusión	La alineación continua de fibras en una orientación preseleccionada se impregna con resina y se comprime a través de un útil calentado (trefila) para darle la forma a la sección final (p.ej. tubos o perfiles en I). Durante el paso por la matriz se produce un curado parcial o total.

Procedimiento	Resumen de los métodos de proceso y fabricación
Pultrusión	La alineación continua de fibras en una orientación preseleccionada se impregna con resina y se comprime a través de un útil calentado (trefila) para darle la forma a la sección final (p.ej. tubos o perfiles en I). Durante el paso por la matriz se produce un curado parcial o total.
Moldeo por prensado en el frío	Es un proceso de baja presión y temperatura en el que las fibras se impregnan con resina y se comprimen entre dos útiles macho y hembra. El calor se genera durante el curado.
Inyección de resina	Se ponen fibras en forma de tejido en el útil, el cual se cierra después. Entonces se inyecta la resina a baja presión en la cavidad y fluye entre las fibras hasta llenar el vacío del molde.
Moldeo por inyección con relación reforzada (RRIM)	Un sistema de resina de curado rápido que consta de dos componentes que se mezclan inmediatamente antes de la inyección. Las fibras, o se ponen en el molde cerrado antes de inyectar la resina o se añaden cortadas a trozos y desordenadas a uno de los componentes de la resina para formar una mezcla antes de la inyección

2.1.4 MC utilizados en la industria aeronáutica.

Actualmente, las compañías aeronáuticas se encuentran desarrollando productos hechos con MC reforzados con fibra. El uso de MC ha progresado a través de varias etapas desde la década de 1960. Primero, las piezas de demostración fueron construidas con la filosofía "veamos si podemos construir una". Es posible que nunca haya existido la intención de poner la pieza en un avión y realizar una prueba de vuelo, ya que el objetivo era dar un primer paso hacia el aprendizaje de estructuras compuestas [21].

Durante la década de los 70s, la NASA comenzó a investigar el desarrollo de materiales no metálicos altamente resistentes que pudieran reemplazar a los metales más pesados en las aeronaves. Gradualmente, se utilizaron las estructuras compuestas para reemplazar metales en piezas de la cola, las alas, los motores, el capó y las piezas del fuselaje de las aeronaves, ya que los MC reducen el peso general de la aeronave y mejoran la eficacia de funcionamiento [22]

La segunda etapa fue evaluar la viabilidad de sustituir los componentes convencionales con MC, donde parte del objetivo era probar en vuelo una pieza que fue diseñada para reemplazar una parte metálica en un avión existente. La tercera

etapa o desafío fue establecer líneas de producción para estos nuevos componentes de material compuesto de forma apropiada, en las que el avión está diseñado desde el principio para tener varias piezas fabricadas con MC reforzados con fibra. La etapa final es el avión completamente compuesto que muchas personas han soñado construir durante muchos años. Este último objetivo se ha abordado de la manera deliberada, conservadora, de múltiples etapas que acabamos de describir. Se ha construido una importante tecnología de MC y una base de fabricación que aguarda nuevos desafíos [21].

Las aplicaciones de MC en aviones comerciales comenzaron con unos pocos componentes estructurales secundarios selectivos, todos los cuales estaban hechos de un epoxi reforzado con fibra de carbono de alta resistencia (Tabla 2.2). Fueron diseñados y producidos bajo el programa de Eficiencia Energética de Aeronaves de la NASA (ACEE) y se instalaron en varios aviones durante 1972–1986.[23].

Recientemente, los MC de polímeros reforzados con fibra (MCRF), desarrollados al reforzar diferentes tipos de matrices (por ejemplo, polímeros, cerámicos, metálicos, etc.) con materiales fibrosos están ganando una gran atención en ingeniería aeroespacial [20]

El uso de MC en la industria aeronáutica ha aumentado hasta un 50%, tal como se muestra en la Figura 2.4. y también se han utilizado en la industria aeroespacial en las partes estructurales primarias y secundarias, incluidas las piezas fundidas de los motores de cohetes, los radomos, las antenas parabólicas, las góndolas de los motores, los estabilizadores horizontales y verticales, las cajas de las alas centrales, las alas de los aviones, los mamparos de presión, las puertas del tren de aterrizaje, las carcasas del motor, vigas de suelo, conos altos, paneles de oruga de aleta, estabilizadores verticales y horizontales, etc.[20].

Tabla 2.2. Aplicaciones tempranas de polímeros reforzados con fibra en aviones comerciales Recientemente, los MC de polímeros reforzados con fibra (FRPs) [20].

Aeronave		Componente	Peso	Reducción de peso %	Comentarios
Boeing	727	Hoja de cara de ascenso	98	25	10 unidades instaladas en 1980
	737	Estabilizador horizontal	204	22	-
	737	Alerones de ala	-	37	Instalado en 1973
	756	Alerones, timones, elevadores, carenados, etc..	3340 (Total)	31	-
McDonnell - Douglas	DC-10	Timón superior	67	26	13 unidades instaladas en 1976
	DC-10	Estabilizador vertical	834	17	-
Lookheed	L-1011	Alerón	107	23	10 unidades instaladas en 1981
	L-1011	Estabilizador vertical	622	25	-

Existe una solicitud de patente llamada “*Green aircraft interior panels*” que ofrece una aplicación futura para paneles interior de aeronaves con revestimientos que comprenden compuestos reforzados con fibra natural, basados en una resina termoestable inorgánica o una resina termoplástica [24]. En la se observan paneles decorativos sin propósitos estructurales, es decir, con propósitos donde se poca la exigencia mecánica del componente.

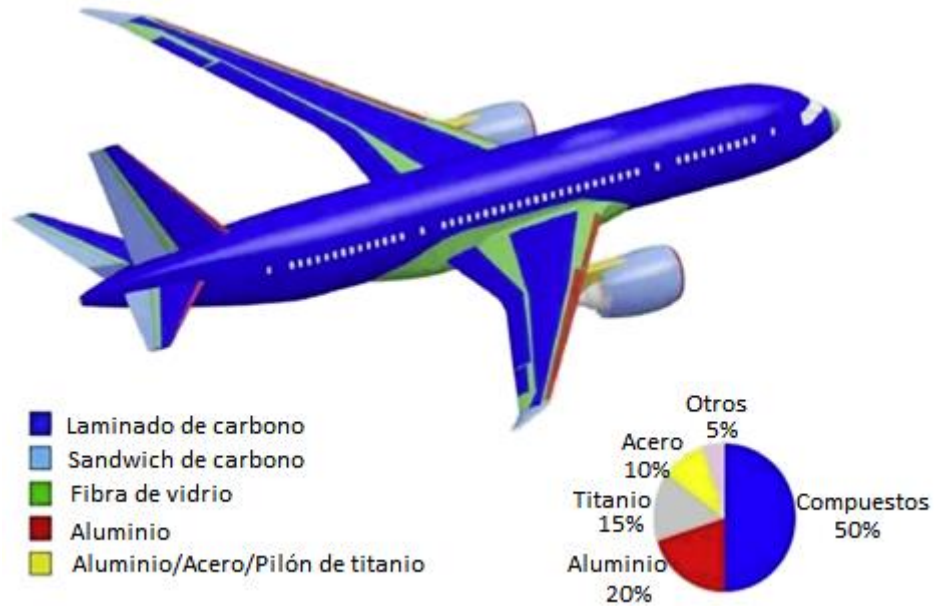
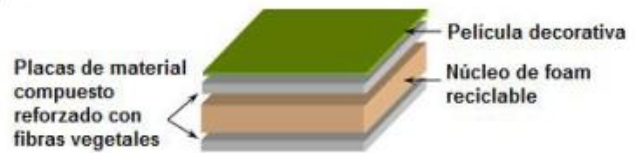


Figura 2.4. Empleo de MC en un Boeing 787 de última generación [25].



a) Interiores de una aeronave objetivos de ser reemplazados por estos nuevos materiales



b) Constitución básica de los MC de matriz polimérica reforzados con fibras vegetales



c) Panel lateral interno de aeronave Boeing hecho con MC reforzados con fibras vegetales.

Figura 2.5 Principal aplicación de los MC de matriz polimérica con refuerzo de fibras vegetales [25].

2.1.5 MC con impacto ambiental.

Los MC basados en fibras de carbono, vidrio, aramida, polietileno de alto módulo y fibras de boro, han desempeñado un papel importante en la industria aeronáutica proporcionando buenas propiedades físicas, tales como peso ligero, alta relación resistencia/densidad y estabilidad térmica. Sin embargo, enfocándose en el área de producción de los materiales sintéticos, es evidente el alto costo de materias primas, residuos tóxicos, problema de salud, elevado consumo de energía y recursos hídricos.

Con referencia a lo anterior, se presenta una nueva problemática al final del ciclo de vida de estos materiales convencionales, debido a que no son renovables, reciclables y/o biodegradables.

El efecto combinado del agotamiento de los recursos petroleros y el aumento de las regulaciones ambientales está generando un creciente interés en el desarrollo de nuevos materiales que sean compatibles con el medio ambiente e independientes de los combustibles fósiles. El Departamento de Agricultura de los EE. UU. Y el Departamento de Energía de los EE. UU. Han establecido el objetivo de que al menos el 10% de todos los componentes químicos básicos se creen a partir de fuentes renovables de origen vegetal en 2020, aumentando al 50% para 2050 [26], [27].

Existen diferentes MC poliméricos biodegradables en la actualidad que tienen un gran impacto ambiental. En la Figura 2.6 se muestra la clasificación de polímeros biodegradables. Las fuentes renovables de materiales poliméricos ofrecen una respuesta para mantener el desarrollo sostenible de tecnologías económicas y ecológicamente atractivas. Las innovaciones en el desarrollo de materiales a partir de biopolímeros, la conservación de materias primas a base de fósiles, la degradabilidad biológica completa, la reducción en el volumen de residuos y la compostabilidad, la reducción del dióxido de carbono atmosférico liberado, así como una mayor utilización de los recursos agrícolas para la producción de nuevos materiales "verdes" son algunas de las razones del aumento del interés público. Los polímeros biodegradables han ofrecido a los científicos una posible solución a los

problemas de eliminación de desechos asociados con los plásticos tradicionales derivados del petróleo.

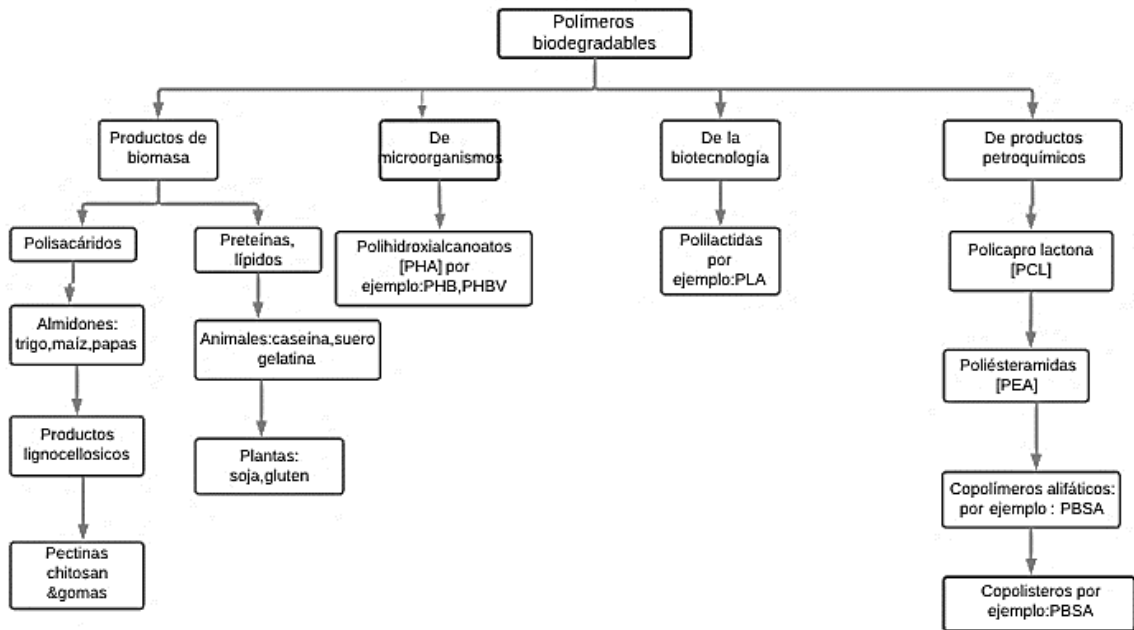


Figura 2.6. Clasificación de polímeros biodegradables [5].

2.2 Fibras utilizadas como refuerzo

Los MCRF se han establecido como materiales actuales que se enfocan en lograr reemplazar materiales convencionales tales como los metales y aleaciones. En diferentes aplicaciones de la aeronáutica se desea conseguir una buena relación resistencia/densidad lo cual ha captar la atención de diversos investigadores e industrias en los últimos años. Los materiales PRF se han desarrollado utilizando diferentes matrices reforzadas con fibras naturales y sintéticas como se muestra en la Figura 2.9.

En la industria aeronáutica se usan diferentes fibras reforzando matrices poliméricas como ejemplo de esto los aviones de las empresas Airbus 380 y Boeing 777 (Figura 2.7 y Figura 2.8).

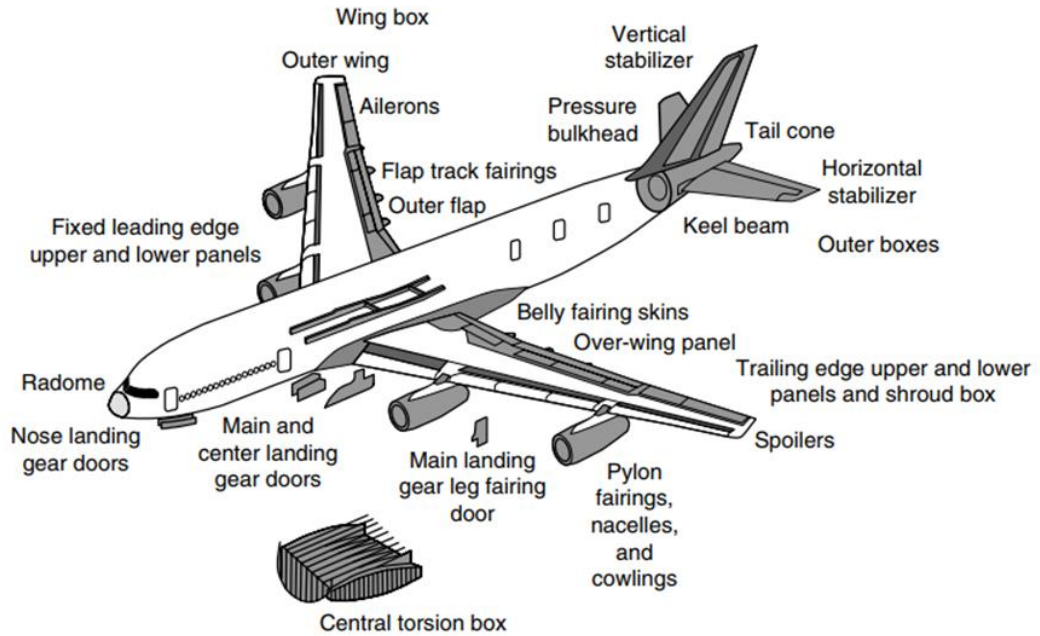


Figura 2.7. Uso de compuestos poliméricos reforzados con fibra en Airbus 380 [28].

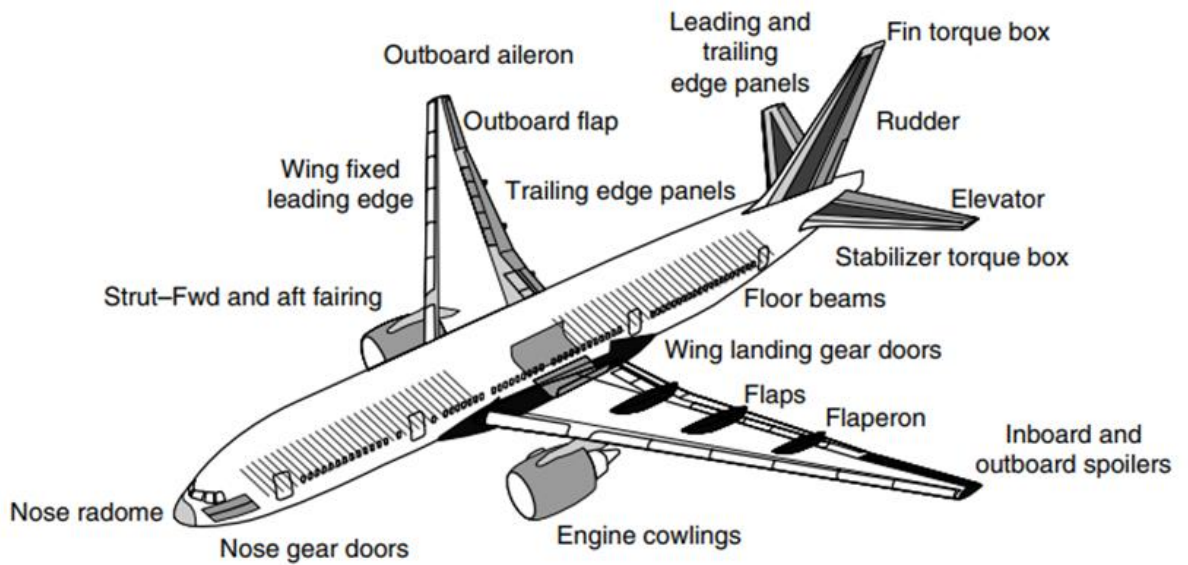


Figura 2.8 Uso de compuestos poliméricos reforzados con fibra en Boeing 777 [28].

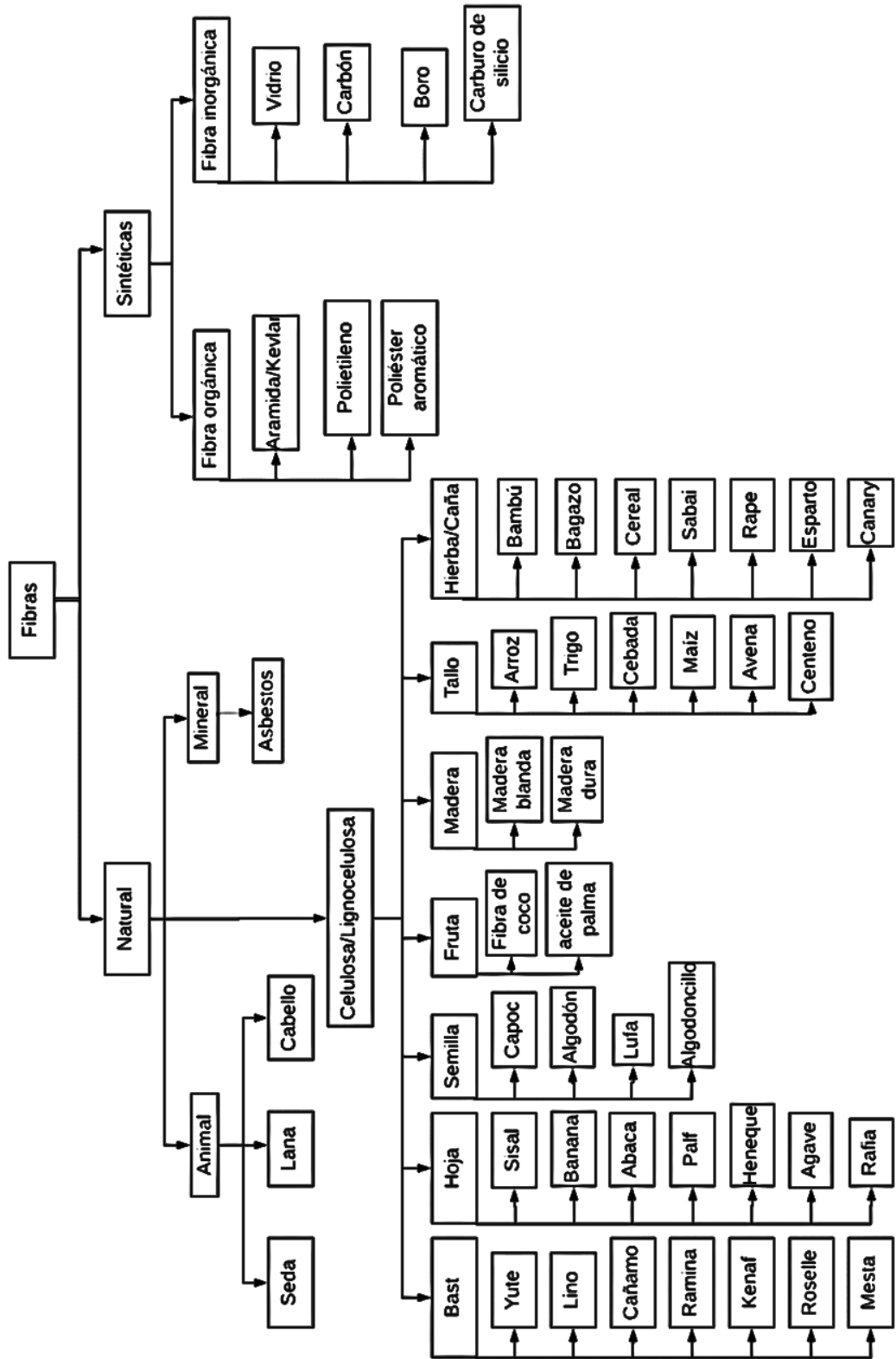


Figura 2.9. Clasificación de fibras naturales y sintéticas [29].

2.2.1 Fibras sintéticas

En el mercado se consiguen fibras de carácter cerámico, metálico y una variedad de fibras poliméricas. Entre estas se puede destacar el uso frecuente de fibra de vidrio, carbono, aramida, boro entre otras utilizadas en la industria aeronáutica, como los compuestos ligeros con alta rigidez, resistencia y fatiga, que están hechos de fibras continuas (generalmente carbono) en una matriz de polímero (generalmente epoxi). Junto con el aluminio, el material compuesto de fibra de carbono es el material estructural más utilizado para el fuselaje de aeronaves y helicópteros. Los compuestos son más ligeros y más fuertes que las aleaciones de aluminio, pero también son más caros y susceptibles a daños por impacto [21].

Los MC de fibra de carbono se utilizan en las estructuras principales de los aviones, incluidas las alas, el fuselaje, el empenaje y las superficies de control (por ejemplo, timón, elevadores, alerones). Los compuestos también se utilizan en las secciones más frías de los motores a reacción, como las paletas del ventilador de entrada, para reducir el peso. Además de los compuestos con fibras de carbono, los compuestos que contienen fibras de vidrio se usan en radomos y los componentes semiestructurales, como los carenados y los compuestos que contienen fibras de aramida, se utilizan en componentes que requieren una alta resistencia al impacto [21].

2.2.2 Fibras naturales (celulosa/lignocelulosa).

Las fibras naturales poseen muchas ventajas, tales como baja densidad y propiedades mecánicas relativamente altas, tales como el módulo y la resistencia específicos. Recientemente, las fibras naturales se han vuelto atractivas para los investigadores como un refuerzo alternativo para el polímero reforzado con fibra [3]. Además estas fibra poseen las características de ser renovables y biodegradables [4], Las fibras naturales se subdividen en función de sus orígenes, provenientes de plantas, animales o minerales. Las fibras de plantas están compuestas de celulosa, las fibras animales están formadas por proteínas (cabello, seda y lana) [5], mientras que las minerales son combinaciones elaboradas por los seres humanos.

Las fibras naturales se pueden considerar compuestos que consisten principalmente en fibrillas de celulosa incrustadas en la matriz de lignina, en otras palabras, una fibra natural se trata de un material compuesto. Las fibrillas de celulosa se alinean a lo largo de la longitud de la fibra, lo que proporciona una mejor resistencia a la tracción, flexión y adicionalmente proporciona rigidez [5]. Existen diversas investigaciones que estudian las fibras naturales como refuerzo de matrices poliméricas tales como el kenaf, el bambú, el bonote y el sisal; estas han demostrado ser materiales de alta resistencia en la industria aeroespacial y automotriz [6]. Además brindan ventajas en la salud pues estas no son cancerígenas y son seguras durante el procesamiento y la manipulación [7]. Las propiedades mecánicas de la fibra natural dependen del tipo de celulosa y la geometría de la celda elemental. Las cadenas de celulosa están dispuestas paralelas entre sí, formando haces que contienen cada una cuarenta o más macromoléculas celulósicas unidas por enlaces de hidrógeno y mediante enlaces con hemicelulosas amorfas y lignina que confieren rigidez a la fibra llamadas microfibrillas [30]. De acuerdo con lo anterior en el Anexo A muestra un gran rango de diferentes fibras naturales con sus propiedades físicas y mecánicas.

Anteriormente las fibras naturales no eran tomadas en cuenta como material de refuerzo de matrices poliméricas porque existen algunas desventajas que serán mencionadas a continuación:

- Baja estabilidad térmica, en otras palabras, la posibilidad de degradación con el cambio de temperatura (230 – 250°C) [31].
- Por la naturaleza hidrofílica de la superficie de la fibra, como consecuencia de la presencia del grupo hidroxilo y varios constituyentes polares, el cual conduce a una pobre adhesión entre las fibras y la matriz hidrofóbica (polímero). La naturaleza hidrofóbica puede conducir también a hinchazón y maceración de las fibras. Además, el contenido de humedad disminuye significativamente las propiedades mecánicas de las fibras [31].

- La variabilidad de las propiedades dependen de la calidad del cultivo, edad y cuerpo de la planta del cual son extraídas, las técnicas de extracción y condiciones medioambientales del lugar [31]

Las anteriores desventajas hacen que el uso de fibras vegetales en MC fuera menos atractivo que las fibras convencionales como las de vidrio, carbono, aramidas. Además, las propiedades de estas últimas son superiores. Sin embargo, la producción de MC reforzados con fibras convencionales requiere una gran cantidad de energía que es sólo parcialmente recuperado con la incineración del compuesto. Esto ha atraído de nuevo la atención hacia las fibras vegetales debido a sus ventajas económicas y medioambientales ya mencionadas. Así, las fibras vegetales están emergiendo rápidamente como una opción viable como material de refuerzo en MC con la ayuda de tratamientos que permitan disminuir sus desventajas, principalmente en mejorar la compatibilidad fibra vegetal - polímero y la adhesión entre ambos constituyentes, con el fin de obtener propiedades adecuadas [15].

Se ha demostrado que la energía necesaria para la producción de fibras vegetales es, en promedio, menos de la mitad de la cantidad necesaria para producción de las fibras sintéticas (Figura 2.10). Así, ha aumentado el interés en el estudio del posible uso de fibras naturales cuyas características generales se pueden resumir en términos de su peso ligero, comportamiento no-abrasivo, carácter inflamable, nula toxicidad, propiedades biodegradables, bajo consumo de energía para la producción, cero emisiones de CO_2 si es quemado, disponibilidad y renovabilidad en comparación con las fibras convencionales [31]. A causa de estas propiedades mencionadas, las fibras vegetales están emergiendo rápidamente como una opción viable como material de refuerzo en MC [32]. Anexo a esto en la Figura 2.11 se muestra el costo de fibras naturales son comparado con la fibra de vidrio y carbono.

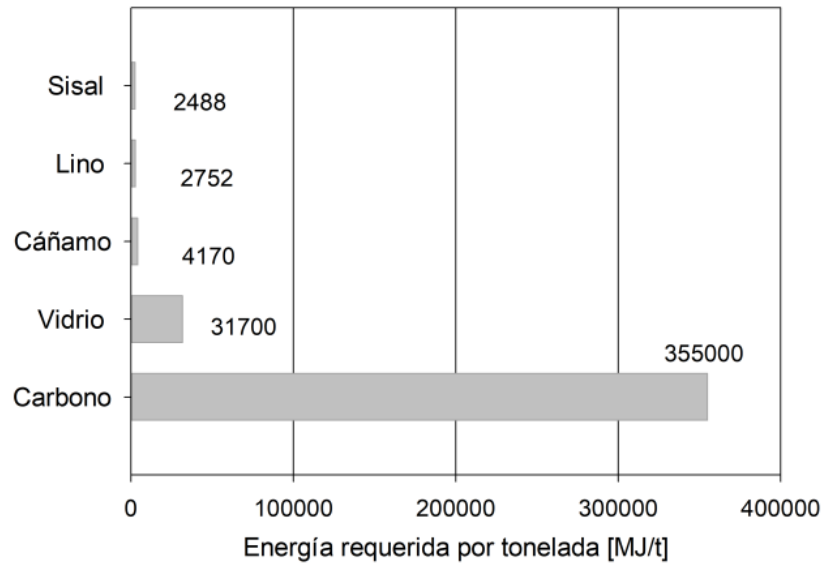


Figura 2.10. Energía requerida para la producción de algunas fibras [31].

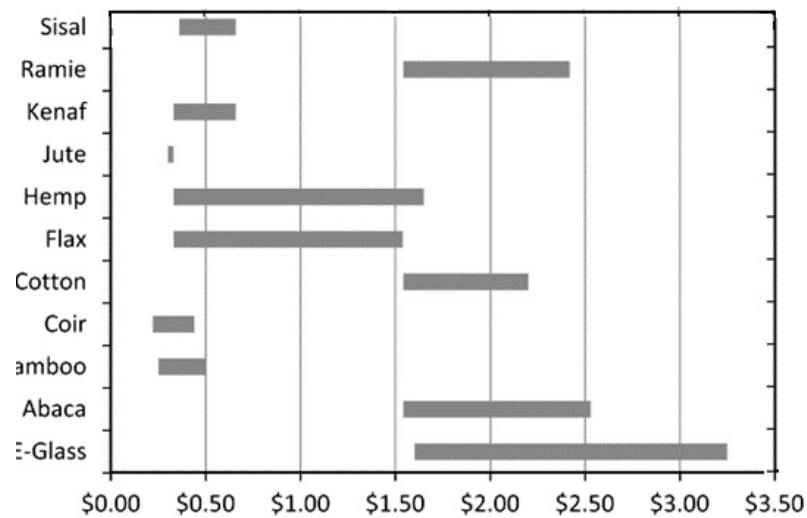


Figura 2.11. Costo en dólares por Kg de fibras naturales según literatura [27].

2.3 Antecedentes de investigaciones de MC usando fibra de bambú como refuerzo en un PLA.

A continuación, se muestran algunos resúmenes de diferentes investigaciones que han analizado compuestos reforzados con fibras de bambú.

Material compuesto de ácido poliláctico (PLA) - bambú para aplicaciones estructurales *A. Pozo Morales et al.*[2] utilizaron tiras delgadas de 1,5 mm x 1500 mm de espesor y largo, respectivamente, utilizando la parte interna del bambú. Las tiras delgadas de bambú se unieron utilizando una matriz termoplástica de ácido poliláctico (PLA), fabricando laminados que fueron comparados con las propiedades de los laminados convencionales de fibra de vidrio con matriz epóxica. Los autores concluyeron que, aunque las aplicaciones potenciales del material desarrollado para la industria aeroespacial son muy restringidas, las altas propiedades mecánicas podrían cumplir los requisitos de otros sectores industriales, como la energía o industria automotriz. Un ejemplo de esto pueden ser las palas de las turbinas eólicas que suelen estar fabricadas por MC de fibra de vidrio, también este material compuesto podría emplearse en algunas superficies para automóviles [2].

Banik N. et al. realizaron un diseño de experimento mediante Taguchi para observar qué parámetro posee mayor influencia en las propiedades mecánicas de un compuesto formado por fibras de bambú y matriz de silicato de sodio + acetato de etilo. Los resultados experimentales muestran que la presión de procesamiento y el porcentaje de contenido de fibra tienen un impacto significativo en la eficiencia final de los MC. En cuanto al método de fabricación, determinaron que la alta presión de procesamiento puede dañar la fibra y conduciría a una disminución de resistencia de la matriz y a una menor presión se obtiene una baja adhesión fibra /matriz del laminado [33].

Fang Wan et al. fabricaron un material compuesto entre el ácido de poliláctico (PLA) reforzado con fibras de bambú (BF) obteniendo un material 100 % natural y biodegradable para aplicaciones industriales. Estudiaron sistemáticamente la influencia de un tratamiento químico para las fibras de bambú usando 4 % en masa de solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH), a temperatura ambiente durante 1 h, sobre las propiedades térmicas y mecánicas de los MC resultantes. La calorimetría diferencial de barrido y el análisis termogravimétrico demostraron que la incorporación de BF tratados promueve una mayor transición vítrea y temperaturas de cristalización de los compuestos resultantes con respecto a los compuestos de fibra no tratados, mientras que el tratamiento con álcali dio como

resultado una estabilidad térmica superior. Además, las superficies de fractura se caracterizan por microscopía electrónica de barrido. Los cambios en la morfología revelaron la posible disolución de hemicelulosa y lignina por alcalinización con NaOH, lo que indica una adhesión interfacial mejorada. Finalmente lograron un incremento en la resistencia a la tracción de los MC a través del refuerzo con 7 fibras tratadas. Sin embargo, un módulo de tracción más bajo es encontrado para compuestos reforzados con BF químicamente modificados, lo que podría deberse a la conversión parcial de celulosa I en II. Los resultados destacan que el uso de BF podría ser un candidato viable como refuerzos para el desarrollo de compuestos biodegradables [34].

Espitia M. et al. realizaron diferentes técnicas para establecer la viabilidad de este tipo de fibra en MC para lograrlo ellos emplearon técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Microscopia de Fuerza Atómica (MFA) y pruebas de absorción de humedad, densidad aparente y resistencia de tensión en las fibras. Esto con el fin de analizar el comportamiento general de las fibras de bambú, para determinar su viabilidad como refuerzo en MC en el área estructural. A partir de la caracterización, determinaron que el bambú tiene una excelente resistencia de tensión, que puede ser utilizada como refuerzo en matrices poliméricas debido a su alta rugosidad; es decir, su superficie irregular genera pequeñas anclas con la matriz (mejorando así la adhesión fibra/matriz), es ligera y presenta una excelente absorción en comparación con otras fibras [35].

2.4 Tecnologías de manufactura aditiva en MC.

La MA, también conocida como impresión 3D, es una fabricación capa por capa de objetos 3D a partir de un modelo digital [36], [37]. Durante el proceso, el material se deposita en capas individuales; Cada capa está unida/fusionada mediante diversas técnicas (sinterización, fusión, curado, reacciones químicas, etc.) [21]. La ventaja clave de la MA es la libertad que brindan a los diseñadores para crear diseños de productos que no se pueden fabricar de manera convencional [38]. Además, este método de construcción mediante capas disminuye costos al nivel de

producción debido a que solo necesita 5 etapas, que inicia desde la construcción de diseño hasta obtener la pieza final como se muestra en la Figura 2.12

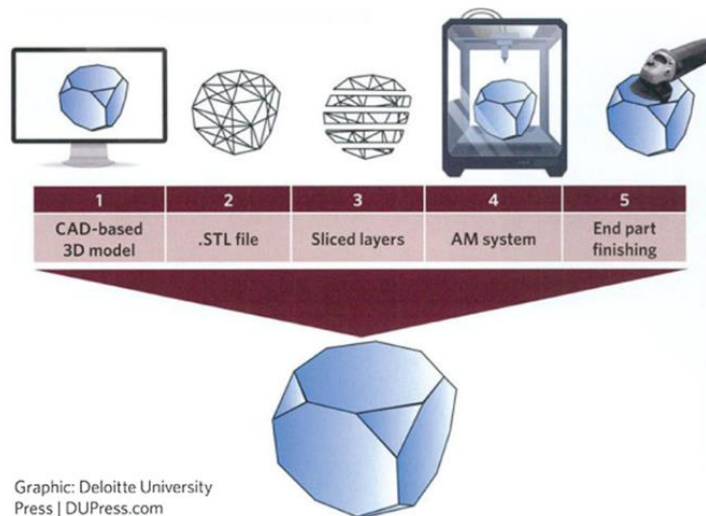


Figura 2.12. Proceso de manufactura aditiva [10].

El consumo global de máquinas de impresión 3D, materiales (filamentos, polvos, etc.), software y servicios relacionada con la MA, ha aumentado en un total de en US\$ 1 mil millones a un total de US\$ 5.165 mil millones, según la información recolectada de 51 fabricantes de sistemas industriales, 98 proveedores de servicios, 15 productores de materiales de terceros, varios fabricantes de impresoras de escritorio 3D y 80 expertos en impresión 3D de 33 países de todo el mundo [39],[40].

Cuando se habla de MC de resinas reforzadas con fibras, se puede observar dos etapas de proceso de manufactura: la configuración del laminado y el curado. La primera incluye el conjunto de acciones que hay que realizar hasta obtener la configuración final del material compuesto, como es el apilado de láminas de pre-impregnado según una secuencia y siguiendo un molde determinado. El curado es el proceso de polimerización de la matriz para formar los enlaces permanentes entre la matriz y las fibras en una lámina y a su vez entre las propias láminas [41]

La tecnología aditiva realiza simultáneamente las fases de laminado y curado, elaborando la automatización del proceso, la MA en MC se realiza mediante una

impresora 3D a temperaturas indicadas para dicho material siendo este depositado en una superficie plana.

2.4.1 Modelado por deposición fundida (MDF)

En el presente documento se ha enfocado en la técnica de modelado por deposición fundida, técnica creada por Scott en 1989 [42]. Esta técnica es una de las más populares a nivel de impresión 3D en MC de polímeros que se basan en sistemas de fabricación de aditivos de extrusión (MA) [10].

Los sistemas MA basados en extrusión utilizan una boquilla de deposición controlada por computadora para crear patrones y objetos 3D con composición y arquitectura controladas [43]. MDF es una técnica de fusión de material que utiliza un carrete de filamento termoplástico tales como PC, ABS y PLA (por mencionar algunos) con diámetros variables para ser fundido y extruido a través de una boquilla caliente [10].

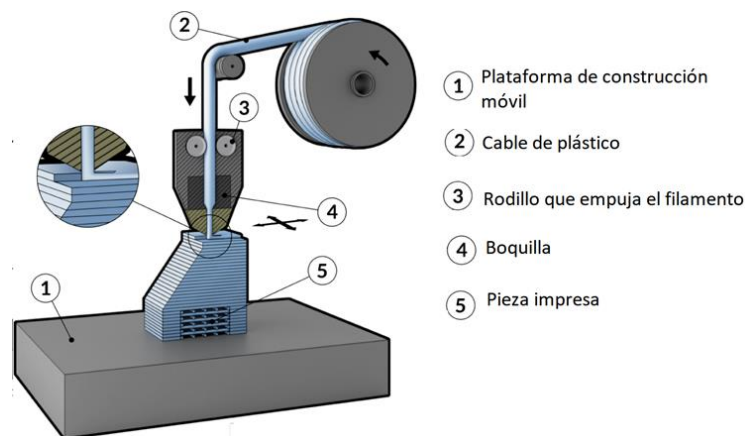


Figura 2.13. Diagrama del proceso de modelado por deposición fundida [44].

2.4.2 MC utilizados en MDF.

Debido a los desarrollos y el interés de las principales compañías aeroespaciales para implementar la MA, se ha convertido en un tema muy discutido en las últimas décadas. Debido a su capacidad para producir piezas con una alta complejidad geométrica y cortos plazos de fabricación, MA se ha utilizado más especialmente en

los deportes aeroespaciales y de motor [45]. Históricamente se presentaron prototipos de plástico utilizando las técnicas de estereolitografía SLA, sinterizado selectivo por láser SSL, modelado por deposición fundida MDF, entre otras. La producción de materiales cerámicos, metales y compuestos se dieron a conocer recientemente.

Los materiales más investigados y disponibles son los metales y los materiales poliméricos. Sin embargo, los cerámicos y MC aún se consideran en fase de desarrollo. Adicionalmente, para el sector aeronáutico, la implementación de un nuevo material a cierto componente; debe primeramente pasar diferentes certificaciones y acreditaciones establecidas en las normatividades aeronáuticas. Por ejemplo, pruebas que certifiquen un comportamiento mecánico estipulado como también pruebas de flamabilidad del material para cubrir la normatividad (por mencionar algunos). Con base a lo anterior, una primera instancia para estudiar la viabilidad de uso de un nuevo MC es precisamente analizar su comportamiento mecánico con el fin de conocer si cumple o no los requerimientos mecánicos para su implementación a cierto componente aeronáutico.

La tecnología de fabricación de MC de bajo costo ha sido un tema de investigación importante en diferentes sectores de producción. Se ha desarrollado una amplia variedad de métodos de procesamiento de MC, pero la mayoría de estos métodos son de un ciclo de proceso largo, laboriosos y requieren mucha energía [46]. De acuerdo con lo anterior, se puede decir que el alto costo de la fabricación de una pieza limita el alcance y utilización de los MC, lo que brinda un mayor interés en las nuevas técnicas de manufactura avanzada.

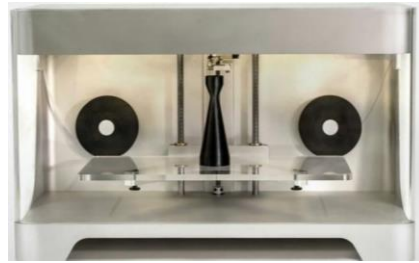
La MA a través de la técnica de MDF se está convirtiendo en la tecnología preferida para la producción rápida de herramientas de reparación y de moldeo de compuestos a bajo volumen y a altas temperaturas ($>177^{\circ}\text{C}$ [350°F]), así como para las herramientas desechables de producción a temperatura moderadas ($<177^{\circ}\text{C}$ [350°F]) [47].

La tecnología MDF ofrece la forma más rápida y económica de producir estructuras de MC. Se tardan días y no meses en producirlas, y se evitan los costos, la mano de

obra y los largos plazos de entrega propios de los métodos tradicionales de fabricación de herramientas [48]. Recientemente, se ha trabajado en la posibilidad de aplicación de mezclas de ABS: polvos de acero, aluminio, cenizas de madera [49], fibras sintéticas, fibras naturales y partículas.

Recientemente, el refuerzo de fibra en MDF ha sido muy popular. La mayoría de los esfuerzos se han centrado en el desarrollo de filamentos con aditivos de fibra corta [50], debido a que las propiedades de los plásticos pueden mejorarse reforzándolos con fibras [51]. La adición de fibras o nano fibras reforzando un material termoplástico manufacturado aditivamente aumenta la rigidez y disminuye la variación del diámetro del filamento en el cabezal de extrusión durante el proceso [52]. La presencia de fibras puede mejorar la ductilidad, flexibilidad, temperatura de reblandecimiento y temperatura de distorsión por calor del MC, mediante la adición de un polímero lineal en la mezcla [53]. Existen dos metodologías para obtener un material compuesto a través de la técnica de MDF como se explican a continuación.

- Fabricación Continua de Fibra, termino brindado recientemente por la empresa Markforged® [54], cuando dio a conocer en la industria la primera impresora 3D en utilizar filamentos de fibras con el nombre “*Mark One*”. Este equipo utiliza fibras de carbono, vidrio y Kevlar. El proceso de fabricación CFF funciona de la siguiente manera. La impresora 3D utiliza una cabeza doble, una boquilla permite realizar un proceso propio de extrusión de un filamento termoplástico y la segunda permite transmitir la fibra que se utilizara aportándole refuerzo estructural creando un material compuesto con altas propiedades mecánicas [55]. En se muestra la impresora de MarkForged® y una descripción grafica del proceso que se lleva a cabo.



a)Mark One [54]

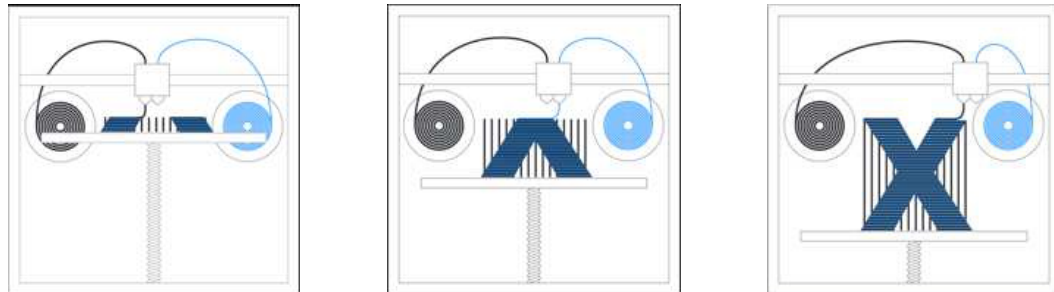


Figura 2.14. Descripción grafica del Proceso MDF en MC [56].

- Extrusoras, son máquinas comerciales que permiten reciclar termoplásticos antes utilizado y fabricar MC, brindan un amplio rango de combinaciones, debido a que se pueden combinar metales, termoplásticos, fibras y partículas entre otros. Este tipo de equipos permiten al usuario o investigador plantear sin límites nuevos filamentos y establecer los parámetros de manufacturación. En la Figura 2.15 se muestra el proceso del extrusor.

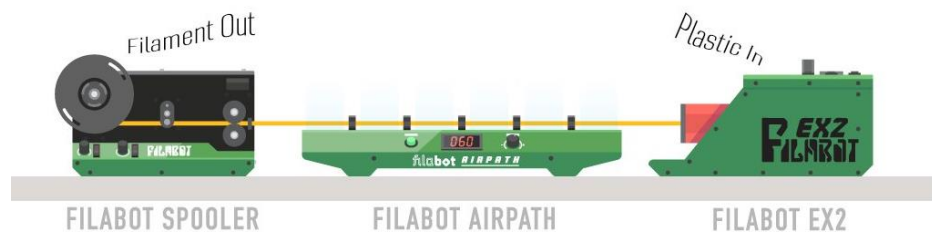


Figura 2.15. Proceso de extrusor marca Filabot® [57].

La MA ha permitido producir piezas altamente personalizadas con propiedades mecánicas significativamente mejoradas, en comparación con polímeros no reforzados [50]. De acuerdo a lo anterior, diferentes investigadores han enfocado estudios de las propiedades mecánicas de este tipo de materiales a través de la

técnica de MDF con fibras, como es el caso de Thomas Hofstatt et al. que estudió el material compuesto de PLA reforzado con fibras de carbono llevando al resultado que las fibras de carbono cortas mostraron un efecto creciente en el módulo de Young, pero disminuyeron en la resistencia a la rotura y la resistencia a la tracción [58].

Fuda Ning et al. realizaron el estudio de un MC fabricado por ellos mismos a partir de fibras de carbono de dos longitudes de fibra diferente y el termoplástico ABS, dando como resultado de que al agregar las fibras de carbono al material plástico aumenta la resistencia a la tracción y el módulo de Young, pero puede disminuir la tenacidad, la resistencia del rendimiento y la ductilidad [59].

Yao *et al* evaluaron fibras de carbono en una matriz de epóxica + poliamida y PLA para estudiar la resistencia y el comportamiento piezorresistivo de las estructuras impresas, las piezas manufacturadas presentaron un aumento en sus propiedades mecánicas a tracción y flexión, sin embargo, los materiales presentaron poca adherencia [60]

Dickson *et al* estudiaron el comportamiento mecánico de los compuestos reforzados con fibra de vidrio, Kevlar y carbono embebidos en una matriz de nylon, todas las combinaciones realizadas presentaron un aumento en la resistencia a tracción y flexión con respecto a la matriz sin refuerzo, a pesar de ello detectaron una interfaz débil y porosidades en los compuestos [61].

Bettini *et al* estudiaron el rendimiento mecánico de compuesto entre PLA reforzada con fibras de aramida obteniendo mejor resistencia, aunque las muestras presentaron huecos en el compuesto los autores sugieren que esto no afectó en gran medida los rendimientos mecánicos en la dirección de la fibra [62].

Matsuzaki *et al* estudiaron el compuesto formado por PLA reforzados con fibras de yute y fibras de carbono, los dos compuestos presentaron una mejora en la resistencia del material PLA por separado. La fibra de carbono unidireccional mostró propiedades mecánicas superiores a las de los dos reforzados con yute [63],

sin embargo, el yute al ser una fibra natural mostro un buen comportamiento mecánico. En la Tabla 2.3 se presentan otros MC de matriz termoplástica con refuerzos de fibras.

Tabla 2.3.Fibras reforzando termoplásticos [64].

Número	Fibra	Matriz
1	Carbón	ABS
2	Carbón	Nylon
3	Carbón Yute	PLA
4	Carbón	PLA
5	Kevlar	Nylon
6	Carbón	PLA
7	Carbón	ABS
8	Aramida	PLA

Existen diversas posibilidades de crear MC con diferentes técnicas de MA, cuando se trata de materiales poliméricos y fibras se puede sugerir la técnica MDF, tratada anteriormente. Sin embargo, la utilización de fibras naturales en esta tecnología ha ofrecido el interés en diversos investigadores en la creación de materiales 100% naturales y sostenible.

Recientemente K. Pandey [65] presentó un estudio para evaluar la posibilidad de implementar fibras de origen vegetal en una matriz polimérica mediante impresión 3D. El alcance de dicho estudio evaluó tanto diversos termoplásticos como diferentes fibras de origen vegetal. Su trabajo explica de selección de materiales, proceso de extrusión para la extracción de filamento y posibilidad de formado de nuevos productos a través de impresión 3D. Sin embargo, los resultados esperados no fueron satisfactorios debido a limitaciones e investigación más a fondo de los materiales tratados.

Aunque en la actualidad se están implementando varias investigaciones en este ámbito y comercialmente existen diversos materiales a la venta con contenido de fibras naturales de bambú, madera, coco etc. No se encuentran referencias de estudios en sus propiedades mecánicas.

2.4.3 Aplicaciones de la Manufactura Aditiva de compuestos en aeronáutica.

La impresión 3D ha conseguido un interés creciente en diferentes sectores, incluyendo comunidades de investigación y académicas. Recientemente, se han desarrollado técnicas de MA más rápidas y más económica que pueden producir altas calidades de impresión. Además, actualmente se están produciendo materiales poliméricos para impresión 3D con una gama más amplia de propiedades [10].

En la actualidad la MA ha sido muy bien aceptada por la industria aeronáutica y existen varias piezas elaboradas mediante esta técnica debido a que ofrece diferentes posibilidades de lograr una disminución de tiempo de fabricación, densidad, material, costo y gran variedad de geometrías, se puede obtener esto sin poner en riesgo las propiedades mecánicas de los componentes aeronáuticos elaborados por MC. Un ejemplo de componentes de MC fabricados por MA es precisamente la aeronave Airbus A350 XWB que posee más de 1000 piezas de vuelo elaboradas mediante la técnica de MDF. Aquellos componentes de MC fabricados por impresoras 3D fueron justificadas con la finalidad de aumentar la flexibilidad de la cadena de suministro, permitiendo a la compañía Airbus cumplir con su compromiso de entrega a tiempo [66].

El mundo de la impresión 3D ha evolucionado rápidamente durante la última década, y esa evolución ha ampliado enormemente la utilidad de la impresión 3D en el sector aeronáutica. En las Figuras 2.16 y 2.17 se muestran algunas piezas elaboradas para aplicaciones aeronáuticas que han elaborado mediante MA.



Figura 2.16. Carenado aerodinámico (Derecha) moldeado y (izquierda) a través de MA de compuesto ULTEM 1010 a alta temperatura [47].

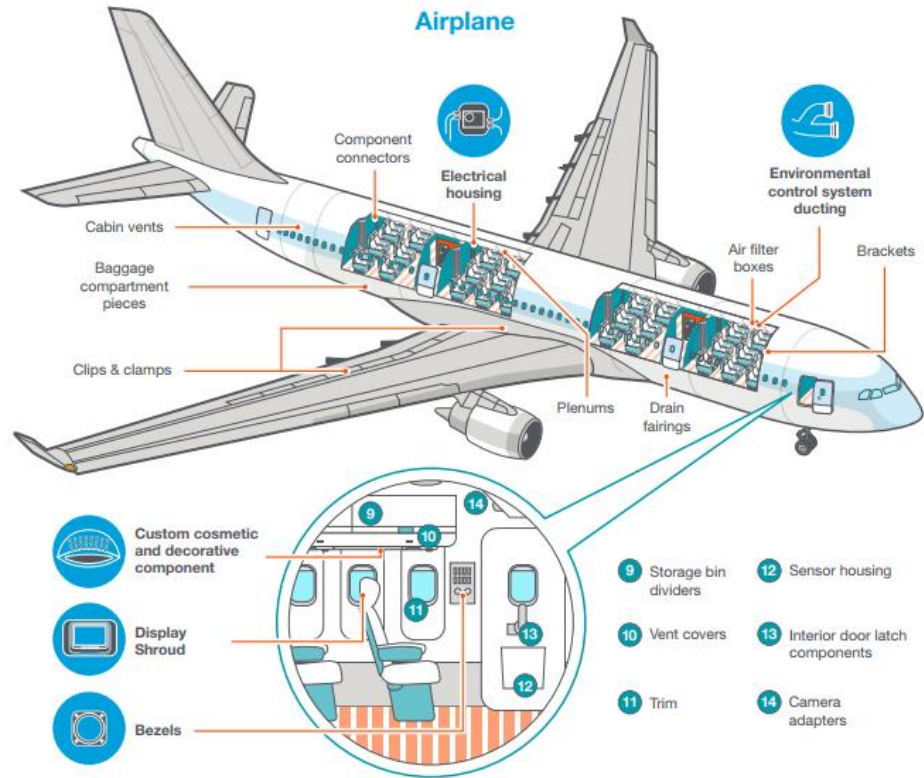


Figura 2.17. Aplicaciones de material polimérico utilizando MA en diferentes piezas de una aeronave [67].

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Selección de material

Actualmente existen diferentes materiales usados en la técnica de MA conocida como MDF, tal como el ABS, ASA, NYLON, PETG, PLA, etc. Sin embargo, diversos fabricantes se han enfocado en la combinación de los existentes incluso en la elaboración de nuevos materiales para satisfacer los diferentes campos de aplicación de la MA.

La selección del filamento comercial utilizado en esta investigación trata de un material compuesto de una matriz de PLA reforzado con un 20% de fibras de bambú, de acuerdo con los siguientes factores:

- El bambú es una gramínea leñosa y arbórea del cual México tiene treinta y cinco (35) especies y cuatro (4) especies de bambú herbáceo [8], además esta planta es conocida por tener el crecimiento más rápido del planeta pues crece entre 75 a 400 mm por día [68] y anexo a esto posee buenas propiedades mecánicas como se muestra en las Tabla 1.1 y Tabla A.1.
- El PLA es uno de los filamentos más utilizados y con mayor aplicación en diferentes tipos de impresoras 3D. Es económico, biodegradable, ofrece un acabado superficial adecuado y posee características físicas y mecánicas aceptables como se muestra en Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas del biopolímero PLA [69].

PROPIEDADES	BIOPOLÍMERO	
	Unidad	PLA
Densidad	g/cm ³	1.21 -1.25
Resistencia a tracción	MPa	21 - 60
Módulo de elasticidad	GPa	0.35 - 3.5

- El material para estudiar es 100% biodegradable, además, sus materias primas son sostenibles, de baja densidad, económico, no tóxicos, renovables y ambientalmente responsable, (ver Figura 3.1).

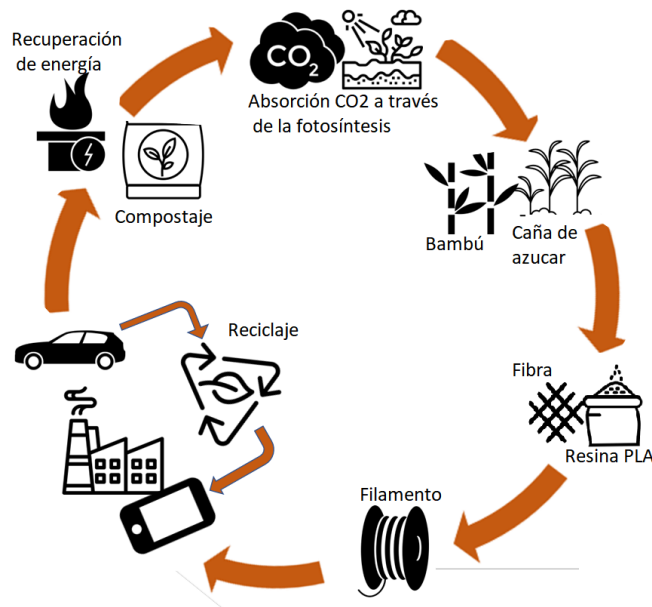


Figura 3.1. Ciclo 100% biodegradable del filamento a estudiar.

3.2 Diseño de experimentos planteado

Un método eficiente de planificación experimental es el diseño de experimentos (DOE) mediante la metodología de Taguchi que incorpora la matriz ortogonal L9. Esta es una teoría estadística que garantiza la calidad de las muestras y recopila datos significativos con el mínimo número posible de repeticiones, además, puede determinar la importancia y la contribución de cada factor en la resistencia a tracción.

Existen diferentes factores en el proceso de MA que influyen en las propiedades mecánicas de las muestras elaboradas mediante la técnica MDF, como las propiedades del material de moldeo, condiciones de proceso, tratamientos y parámetros del equipo. Este proyecto estudia principalmente la influencia en las propiedades mecánicas de tracción de tres factores a) geometría, b) altura de capa y c) porcentaje de relleno. Los factores seleccionados y sus niveles se muestran en la Tabla 3.2 y las implicaciones específicas de estos los factores se describen a continuación

De acuerdo con lo anterior los factores y niveles (bajo, medio y alto), seleccionados se llevaron a cabo para desarrollar el diseño de experimentos en el software Minitab® 18, para tener un amplio rango de combinaciones, como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2. Factores y niveles elegidos en esta investigación con su respectiva justificación.

Factores	Niveles	Justificación
Geometría	Grid -Cúbica -ZigZag	Se eligieron 3 geometrías de deposición que ofrece el software utilizado, Cura, y estas geometrías, pueden obtener una mayor influencia en el ensayo a tracción.
Altura de capa mm	0.10 - 0.15 -0.20	Este parámetro está relacionado directamente con el diámetro del extrusor, en esta investigación se utilizó un extrusor de 0.4 mm, de acuerdo con el material se eligieron estas tres (3) dimensiones, debido que si se utilizaba uno mayor el extrusor sufre obstrucción de la boquilla.
Porcentaje de relleno %	50 - 75 -100	Se eligieron estas tres densidades de relleno, para observar si existe linealidad en las propiedades y realizar esto en porcentajes mayores al 50%

Tabla 3.3. Combinaciones para el diseño de experimentos.

Combinación	Geometría	Altura de capa mm	Relleno %
1	Grid	0.10	50
2	Grid	0.15	75
3	Grid	0.20	100
4	Cúbica	0.10	75
5	Cúbica	0.15	100
6	Cúbica	0.20	50
7	ZigZag	0.10	100
8	ZigZag	0.15	50
9	ZigZag	0.20	75

3.3 Parámetros previos a la fabricación de las probetas.

Se realizaron diferentes pruebas de impresión para establecer los parámetros adecuados, con el fin de obtener un acabado óptimo y estándar. Para esto se elaboraron pequeños cubos con diferentes diámetros de boquillas como, 0.4, 0.6 y 0.8 mm. En este mismo orden, se identificó como prioridad una menor velocidad de impresión y por lo tanto un mayor tiempo de fabricación para cumplir con los acabados planteados, seleccionando la boquilla 0.4 mm.

Durante la fabricación de los cubos también se pudo evidenciar que a la impresión la estaban afectando otros parámetros como la temperatura ambiental y la temperatura del extrusor.

De acuerdo con lo anterior se estableció una temperatura máxima en el ambiente de 18°C y una temperatura de extrusor de 200°C durante el proceso de construcción de las muestras.



Figura 3.2. Print core y muestra realizadas que permitieron elegir parámetros de manufacturación

Hechas las consideraciones anteriores, se elaboraron nueve (9) cubos adicionales con los factores y niveles planteados en el diseño de experimentos, las últimas tres (3) capas no se realizaron para observar la geometría, en la *Figura 3.3* se muestra cada una de las combinaciones establecidas en el diseño de experimentos

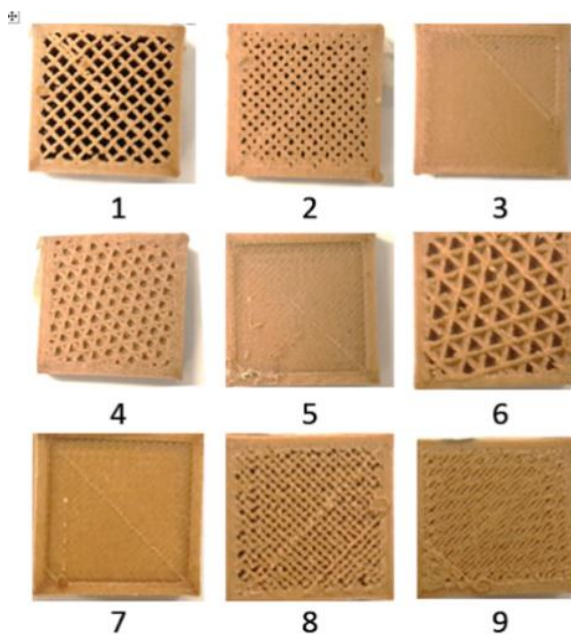


Figura 3.3. Combinaciones del diseño de experimentos manufacturadas.

3.4 Manufactura aditiva de probetas

El estudio se enfocó en la determinación de las propiedades mecánicas a tracción de las combinaciones planteadas de acuerdo con el diseño de experimentos. A continuación, se presenta el procedimiento seguido para la preparación de las probetas según las normas ASTM D638-10 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*” [70], método de prueba estándar para las propiedades de tracción de plásticos.

3.4.1 Dimensiones de las probetas.

Hasta el momento no existe ninguna normativa para realizar el ensayo mecánico a tracción de probetas fabricadas a través del método de manufactura aditiva, por lo que se ha utilizado la norma ASTM 638D-10 como se muestra en la *Figura 3.4*.

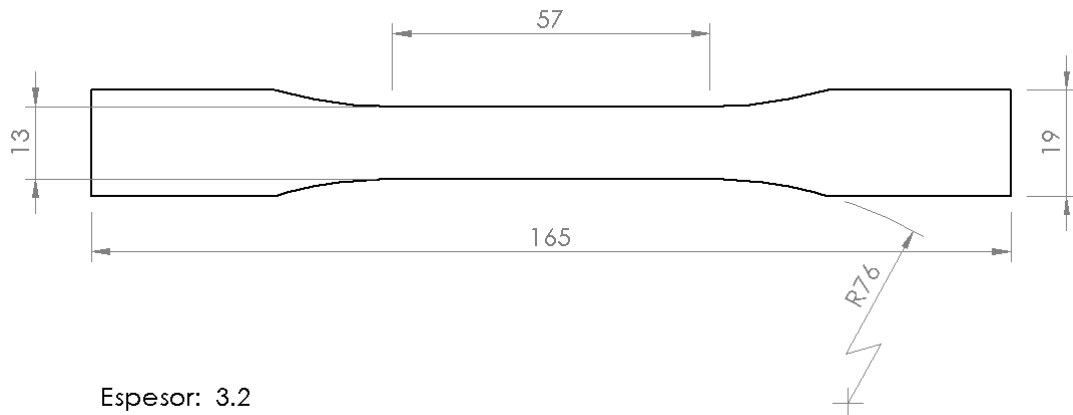


Figura 3.4. Dimensiones finales de la probeta de ensayo a tracción en unidades de mm [70].

La geometría de la probeta para ensayo a tracción se ha utilizado el software de diseño Solidworks® y se exportó en formato STL. Este formato es el que identifica el software de parametrización de la impresora.

3.4.2 Filamento Bamboofill.

Se usó el material compuesto Bamboofill del fabricante ColorFabb, el cual contiene un 20 % de fibras de bambú y un 80% de contenido en PLA. Se usaron 3 bobinas de diámetro de 2.85 mm y con una cantidad de material de 600 gr. Durante el análisis del proceso y construcción de las probetas, no se logró obtener las bobinas del mismo lote lo cual puede ofrecer algunas dispersiones y alteraciones en los resultados, el filamento se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Filamento usado para el estudio.

3.4.3 Manufacturación de probetas.

La manufactura de las probetas se elaboró, de acuerdo con la geometría planteada, utilizando la máquina Ultimaker 3 Extended impresora 3D doble extrusor en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Impresora 3D Ultimaker 3 extended.

La MA de las muestras se basó en los 5 pasos planteados en la Figura 2.12, las dimensiones se laboraron en CAD y se transformaron en archivo .STL, el cual se ingresó al software CURA (ver Figura 3.7). Este software permite ingresar cada uno de los parámetros establecidos como relleno, espesor de capa y geometría de impresión.

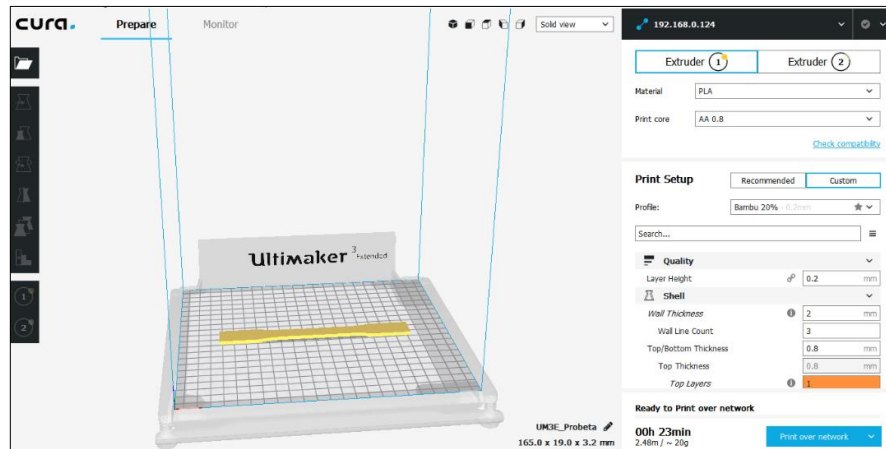


Figura 3.7. Programa cura [71].

Se realizó por cada combinación 7 probetas, para un total de 63 probetas elaboradas de acuerdo con los parámetros utilizados. El tiempo de impresión de cada espécimen fue de 1 hora y 45 min. En la Figura 3.8 se puede observar la combinación cuatro (4) y cinco (5).



Figura 3.8. Ejemplo de muestras elaboradas

3.5 Preparación de las muestras

La preparación de las probetas se elaboró teniendo en cuenta la etiqueta de cada una de las muestras y las mediciones previas de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM 638 seguida en este documento.

3.5.1 Etiquetación de las probetas.

El nombre de cada una de las probetas se realizó de acuerdo con el tipo de material compuesto, geometría, numero de combinación y número de probeta. A continuación, se muestra un ejemplo:

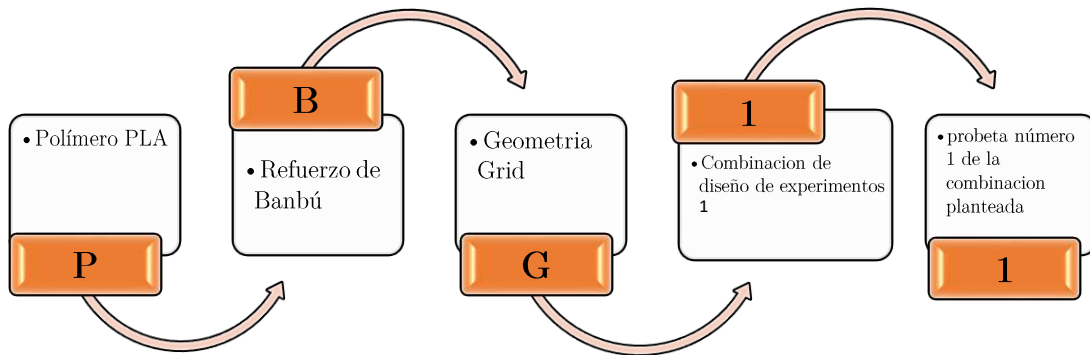


Figura 3.9. Etiqueta de probeta

A continuación, se muestra la Tabla 3.4 con el contenido de todas las etiquetas realizadas para cada una de las probetas MA en esta investigación.

Tabla 3.4. Etiquetas de las probetas elaboradas.

Probeta	Combinación	Probeta	Combinación	Probeta	Combinación
PBG11	1	PBG21	2	PBG31	3
PBG12		PBG22		PBG32	
PBG13		PBG23		PBG33	
PBG14		PBG24		PBG34	
PBG15		PBG25		PBG35	
PBG16		PBG26		PBG36	
PBG17		PBG27		PBG37	
PBC41	4	PBC51	5	PBC61	6
PBC42		PBC52		PBC62	

Probeta	Combinación	Probeta	Combinación	Probeta	Combinación
PBC43		PBC53		PBC63	
PBC44		PBC54		PBC64	
PBC45		PBC55		PBC65	
PBC46		PBC56		PBC66	
PBC47		PBC57		PBC67	
PBZ71	7	PBZ81	8	PBZ91	9
PBZ72		PBZ82		PBZ92	
PBZ73		PBZ83		PBZ93	
PBZ74		PBZ84		PBZ94	
PBZ75		PBZ85		PBZ95	
PBZ76		PBZ86		PBZ96	
PBZ77		PBZ87		PBZ97	

3.5.2 Mediciones previas a ensayos.

La norma ASTM D638 - 10 sugiere determinar el área de la prueba mediante tres lugares en la sección de ensayo. Se tomó una medida en cada extremo y otra en el centro, considerando el valor medio como el área final, mediante a la siguiente ecuación $A = w \times h$ donde A el área, w es el ancho y h el espesor.

Las medidas se llevaron a cabo de la siguiente manera para el espesor en la probeta se utilizó un Mitutoyo 0-1" IP65 Coolant-Proof Electronic Outside Micrometer y para el ancho se usó un Sensor (AOS) Absolute Scale Digital Calipe (ver Figura 3.10).



a) Medidor de espesor



b) Medidor de ancho

Figura 3.10. Equipos utilizados en la medida de espesor y ancho de las probetas a analizar

3.6 Procedimiento de los ensayos mecánicos

En este procedimiento se analizó el comportamiento del Filamento de un material compuesto de PLA con un refuerzo de 20% de fibras de bambú, al someter las probetas a un esfuerzo de tensión uniaxial utilizando la maquina MTS Insight Electromechanical – 100 kN Standard Length. En el laboratorio de ensayos mecánicos del Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas (CENTA), localizado en la ciudad de Querétaro.

3.6.1 Ensayo a tracción.

Este tipo de ensayo mecánico consistió en someter una probeta a una carga uniaxial gradualmente creciente (es decir, estática) hasta que ocurra la falla. La probeta se colocó dentro de las mordazas tensoras adaptándolas bien y teniendo efecto de cuña con accionamiento manual.

Para el alargamiento resultante se utilizó un extensómetro de la marca MTS con una distancia establecida en el área de ensayo de 57 mm. El ensayo tuvo una velocidad de prueba de 5 mm/min y una tasa de deformación al inicio de la prueba de 0.1 mm/mm.min. De acuerdo con la dimensión de la probeta estos son los datos de ensayo sugeridos por la norma ASTM.



a) Máquina de ensayos mecánicos



b) extensómetros utilizados en las pruebas

Figura 3.11. Máquina de ensayo mecánico y extensómetro

CAPÍTULO 4 : RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos luego de la experimentación descrita en el capítulo anterior. Inicialmente se expondrá las propiedades mecánicas de tensión en función del análisis del diseño de experimento mediante Taguchi con el propósito de evaluar el impacto que posee cada uno de los factores estudiados en la respuesta mecánica del material de tal forma de cuantificar la variabilidad y dispersión. Finalmente se realiza un análisis de fractografía en aquellas zonas de falla de algunas probetas, ensayadas durante la prueba de tensión, mediante MEB con el fin de hallar defectos y fortalezas del material manufacturado aditivamente.

4.1 Respuesta de salida del diseño de experimentos

Se realizó un DOE de Taguchi ortogonal L9, en el software Minitab® 18 [72], con el máximo promedio de resistencia, módulo de Young y deformación para cada combinación, tal cómo se muestra en la Tabla 4.1. Adicionalmente se elaboró un análisis de resultados mediante ANOVA, el cual evalúa la varianza entre los diferentes grupos estudiados para observar los efectos generales de cada parámetro del proceso de manufactura en las propiedades finales.

En los DOE de Taguchi, una medida de robustez es la identificación de factores controlables del proceso que, para propósitos de este estudio, los factores controlables son la densidad de relleno espesor de capa y velocidad de extrusor. La dinámica de un diseño de experimento mediante Taguchi es variar los valores de aquellos factores controlables de tal forma que se vea reflejado en la respuesta del diseño y observar y calificar el grado de influencia tanto en la media de la respuesta como en la varianza de ésta.

Tabla 4.1 Datos de diseño de experimentos con resultado de ensayo a tracción.

Número	Geometría	Altura de capa Mm	Relleno %	Resistencia MPa	Módulo de Young MPa	Deformación mm/mm
1	Grid	0.1	50	18.8725	1.9530	0.0125
2	Grid	0.15	75	18.6591	2.0036	0.0126
3	Grid	0.2	100	19.9052	2.2756	0.0129
4	Cúbica	0.1	75	21.2169	2.3340	0.0126
5	Cúbica	0.15	100	23.0848	2.6650	0.0129
6	Cúbica	0.2	50	17.5819	2.1566	0.0123
7	ZigZag	0.1	100	17.7836	2.0682	0.0134
8	ZigZag	0.15	50	19.6812	1.8702	0.0134
9	ZigZag	0.2	75	19.8809	1.7819	0.0138

Los factores de control son aquellos parámetros de diseño y proceso que pueden ser controlados. En un experimento diseñado por Taguchi, los factores de control se manipulan para hacer que haya variabilidad y, con base en los resultados, identificar la configuración óptima de los factores de control que haga que el proceso o producto sea robusto o resistente ante la variación provocada por los factores de ruido [73].

Uno de los objetivos de este estudio es establecer los parámetros óptimos de impresión 3D, para el MC en estudio, de tal forma obtenga una respuesta mecánica aceptable y en lo posible la más alta dentro de las diferentes combinaciones que se evalúan en este estudio. Para ello, el análisis de Taguchi para un diseño de experimentos permite tratar la señal ruido dependiendo del objetivo deseado. Para propósitos de este estudio, se desea que la respuesta entre más grande, es decir, el objetivo es encontrar aquellos factores que afecten a la respuesta de tal forma que incremente su valor. Por lo tanto, la finalidad del estudio es tomar la señal de ruido como más grande es mejor que se calcula con la Ecuación 4.1 [73].

$$\frac{S}{N} = \text{mas grande es mejor} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{Y}_i^2} \right] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Se presenta conjuntamente la respuesta de las medias de los datos para la relación SN para cada uno de los factores (geometría, altura de capa y relleno), con sus respectivos niveles representados como 1, 2 y 3. El Delta es la diferencia entre los

valores de respuesta más altos y bajos para cada factor. Minitab® asigna una clasificación con base en los valores de Delta [58]; La clasificación 1 es para el valor de Delta más alto que es otorgado al relleno, el 2 para el segundo más alto la geometría y la tercera clasificación fue para la altura de capa. Esta clasificación indica el efecto relativo en los factores de respuesta.

Tabla 4.2. Respuesta del diseño para relaciones SN en esfuerzo.

Nivel	Geometría	Altura de capa	Relleno
1	26.23	25.68	25.43
2	25.64	26.19	25.97
3	25.62	25.62	26.08
Delta	0.62	0.57	0.65
Clasificación	2	3	1

Tabla 4.3. Respuesta del diseño para relaciones SN en Módulo de Young

Nivel	Geometría	Altura de capa	Relleno
1	7.517	6.496	5.976
2	6.331	6.663	6.139
3	5.589	6.278	7.323
Delta	1.928	0.384	1.347
Clasificación	1	3	2

Tabla 4.4. Respuesta del diseño para relaciones SN en deformación

Nivel	Geometría	Altura de capa	Relleno
1	-37.98	-37.83	-37.92
2	-37.96	-37.75	-37.72
3	-37.38	-37.73	-37.68
Delta	0.60	0.11	0.25
Clasificación	1	3	2

De acuerdo con las tablas anteriores se dice que los factores que influyen en las respuestas de salida del esfuerzo en el relleno mientras que para el módulo de Young y deformación es la geometría, pues estos factores fueron lo que tuvieron un mayor valor del delta y una mejor clasificación. Sin embargo, en todos los factores y niveles analizados no se presenta un efecto significativo en la resistencia y deformación, debido a su reducida diferencia entre cada uno de los niveles, como se muestra en las Tablas 4.5 y 4.7 donde se estudia el análisis de varianza ANOVA que determinan cuáles factores tienen efectos estadísticamente significativos en la respuesta.

Tabla 4.5. Análisis de varianza del diseño para esfuerzo

Factores	Valor - P
Geometría	0.763
Altura de capa	0.802
Relleno	0.766

Tabla 4.6. Análisis de varianza del diseño para módulo de Young

Factores	Valor - P
Geometría	0.025
Altura de capa	0.394
Relleno	0.043

Tabla 4.7. Análisis de varianza del diseño para deformación.

Factores	Valor - P
Geometría	0.106
Altura de capa	0.806
Relleno	0.459

Para determinar si la asociación entre la respuesta y cada término incluido en el modelo es estadísticamente significativa, se compara el valor p del término con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. La hipótesis nula es que el coeficiente del término es igual a cero, lo que implica que no hay asociación entre el término y la respuesta. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α) de 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5 % de concluir que existe una asociación cuando no hay una asociación real.

De acuerdo con el planteamiento anterior se muestra que, para el esfuerzo máximo y la deformación, ninguno de los niveles indica un resultado significativo mientras que para el módulo de Young el relleno y la geometría de manufactura presentan resultados significativos; lo que es evidente de acuerdo con el aumento en la elasticidad se presenta una disminución en la deformación.

En las Figuras 4.1 a 4.3 se presenta la señal ruido (SN) de las medias de los datos, que consiste en observar la influencia de cada nivel en la varianza de la respuesta. Es indiscutible que ninguno de los factores tiene una tendencia lineal en su comportamiento. Por lo tanto, se evalúan los resultados con base a su incremento o disminución con respecto a la media de la respuesta de salida.

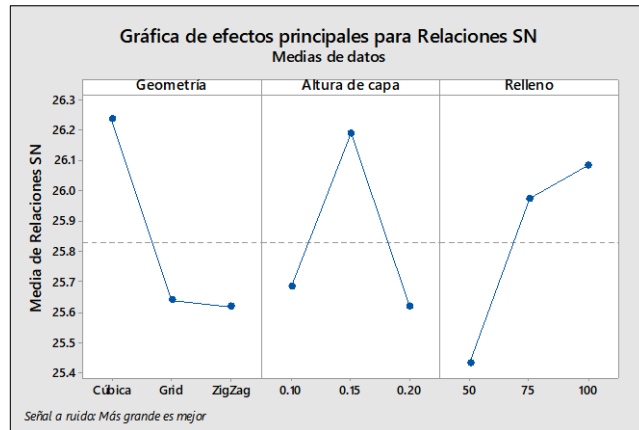


Figura 4.1. Efectos principales para relación de señal ruido en la media de los datos para esfuerzo.

En la Figura 4.1 se puede observar que los niveles de mayor efecto tienen en el proceso son la geométrica cúbica, 0.15 mm de altura de capa y una densidad de relleno de 100%. Es decir, los niveles anteriores tienen una influencia significativa en el esfuerzo final obtenido en las muestras ensayadas, ya que superan los valores de la media (línea central en la Figura 4.1), los niveles que se encuentran debajo de los datos medios representan una influencia negativa en el proceso y respuesta final. A continuación, se mostrará el porcentaje de incremento o decremento que existe en cada nivel respecto a la media de los datos y su efecto principal.

- El factor de la geometría cúbica presenta un incremento del 1.6% con respecto a la media de los datos, la geometría grid y zigzag una disminución de 0.73 % y 0.81 %, respectivamente. Es evidente que el nivel con mayor efecto sobre la respuesta de salida es la geometría cúbica.
- La altura de capa de 0.10 mm y 0.20 mm presenta una disminución de 0.58 % y 0.81 %, respectivamente, mientras en 0.15 mm muestra un incremento leve de 1.39%, presentando mayor influencia en las muestras elaboradas y sus propiedades mecánicas en tracción.
- La densidad de relleno con valores de 75 % y 100 % de relleno obtuvo incrementos de 0.54 % y 0.96 %, respectivamente, mientras un 50 % de

relleno presentó una disminución de 1.55 %, lo que demuestra que a mayor cantidad de relleno mayor resistencia tendrá la pieza manufacturada.

En la Figura 4.2 se presenta la respuesta de salida para el módulo de Young. Los niveles con una influencia positiva con respecto a los valores medios son la geométrica cubica, altura de capas de 0.10 mm y una densidad de relleno de 100 %. Si bien muestra un comportamiento no lineal en la respuesta de salida entre los niveles analizados se presenta una influencia más pronunciada en las geometrías y densidad de relleno. A continuación, se describe cada uno de los niveles con la influencia positiva y negativa:

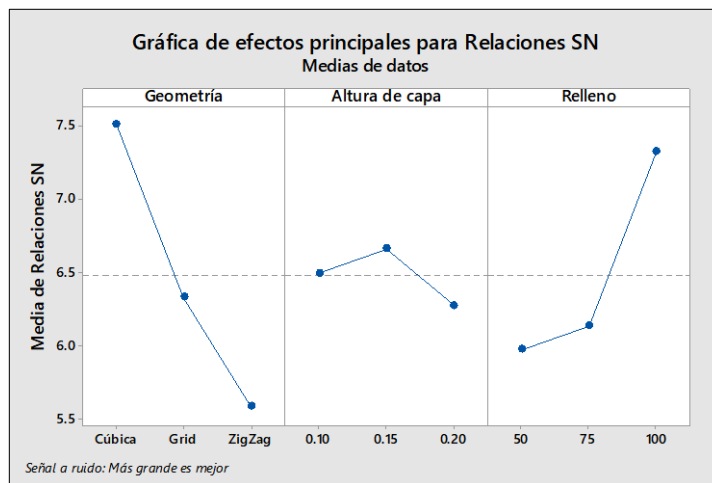


Figura 4.2. Efectos principales para relación de señal ruido en la media de los datos para módulo de Young.

- Factor de geometría cúbica exhibió un aumento notable de 16.02 % respecto a la media, evidenciando una influencia positiva de esta estrategia de deposición. Sin embargo, las geometrías grid y zigzag presentaron disminuciones en el orden de 2.28 % y 13.74 % respectivamente.
- El factor de altura de capa se presentaron aumentos leves para 0.10 mm y 0.15 mm con un incremento de 0.28 % y 2.84 % proporcionalmente con respecto a los datos medias de la señal S/N. En cambio, para una altura de capa de 0.20 mm se presentó una disminución de 3.10 %. Como puede observarse, los incrementos son relativamente pequeños, lo que conlleva a

establecer que estos factores poseen una influencia poco significativa en la respuesta mecánica del MC en estudio.

- Factor de densidad de relleno presenta en el 100 % de relleno de un incremento de 13.03 %, mientras para un 50 % y 75 % de densidad de relleno presentan una disminución de 7.76 % y 5.24 % respectivamente. Evidenciando una influencia negativa en las piezas elaboradas con 50 % y 75 % y positiva en un 100 % de relleno.

La gráfica de efectos principales para los resultados de salida del diseño de experimentos de deformación, presentado en la Figura 4.3 , es notable que los niveles que tuvieron mayor influencia son la geometría zigzag, 0.20 mm de altura de capa y una densidad de relleno de 100 %. muestra una gran diferencia en los factores de altura de capa y geometría de con respecto a los efectos de los niveles en el esfuerzo máximo y módulo de Young. Sin embargo, presenta en la densidad de relleno un comportamiento similar en la respuesta con menor magnitud de influencia como se verá a continuación:

- En el factor de la geometría mostró un aumento, cuando el MC se fabrica en zigzag (geometría), de 0.55 % con respecto a la media de los datos de señal ruido y una disminución de 0.49 % y 1.04 % para las geometrías grid y cubica respectivamente.
- El Factor de altura de capa con un valor de 0.20 mm presentó un incremento de tan solo 0.15 %. Por otro lado, para las alturas de 0.10 mm y 0.15 mm, mostraron una disminución de 0.11 % y 0.057% correspondientemente, con respecto al promedio de la varianza de la respuesta (media de la relación señal/ruido).
- Por último, el tercer factor evaluado es la densidad de relleno, con valores de 75 % y 100 %; evidenciaron un aumento de 0.14 % y 0.25 %, respectivamente. Mientras para un 50 % de densidad de relleno muestra una disminución de 0.39 %.

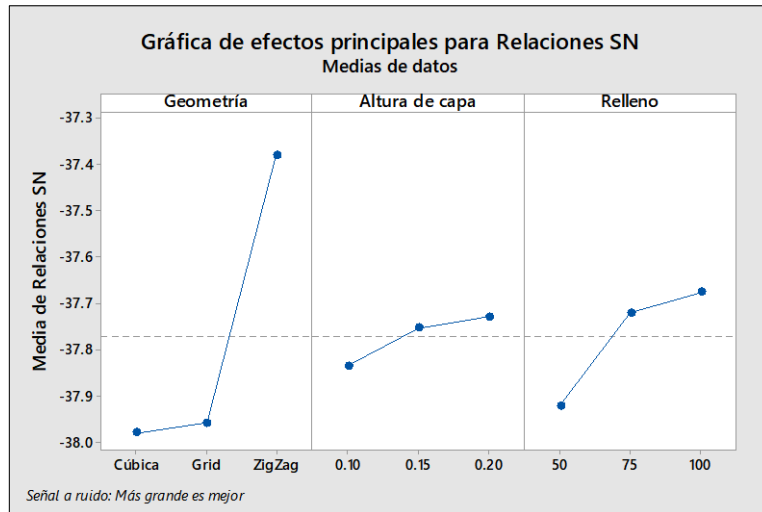


Figura 4.3. Efectos principales para relación de señal ruido en la media de los datos para deformación.

Con base en el análisis de Taguchi realizado precedentemente a los resultados de la experimentación (ensayos mecánicos de tensión), se propone analizar más a fondo, con la ayuda de gráficas de superficie, las respuestas adquiridas. Para ello, las Figuras 4.4 y 4.5 presentan las gráficas de superficie de respuesta cuando se establece como factor fijo la geometría cúbica del MC en estudio, permitiendo observar la tendencia del comportamiento mecánico de tensión reflejado en las respuestas de resistencia a la rotura y módulo de elasticidad, para las diferentes combinaciones del resto de factores de estudio (altura de capa y densidad de relleno). Mientras que el análisis realizado en la respuesta de la deformación a la rotura se estableció como factor fijo la geometría con descripción en zigzag, justificándose que con esta geometría se maximiza los valores de deformación, y puede observarse su tendencia en la Figura 4.6.

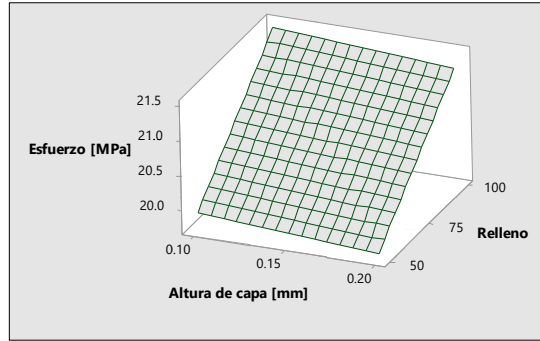


Figura 4.4. Gráfica de superficie con la geometría cúbica fija para resultados de salida de esfuerzo.

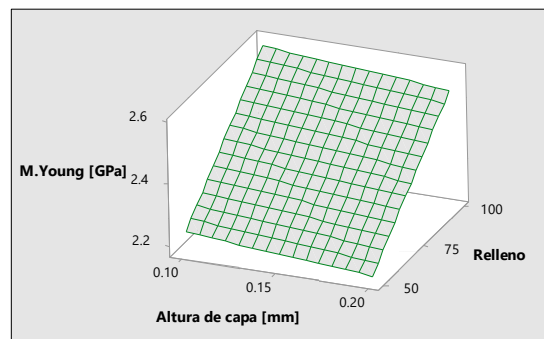


Figura 4.5. Gráfica de superficie con la geometría cúbica fija para la respuesta de salida de módulo de Young.

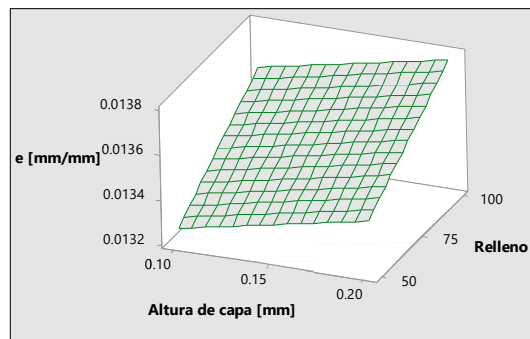


Figura 4.6. Gráfica de superficie con la geometría zigzag fija para la respuesta de salida de deformación.

Además, se anexan las ecuaciones lineales que describe el comportamiento mecánico del MC en estudio, lo cual permite predecir las propiedades mecánicas estudiadas en función de cada parámetro de manufacturación estudiada en esta investigación. (ver Tablas 4.8 al 4.10).

Tabla 4.8. Ecuación de regresión lineal para esfuerzo

Geometría	Ecuación lineal
Cúbica	$Esfuerzo [MPa] = 18.5 - 1.7 \text{ Altura de capa} + 0.0309 \text{ Relleno}$
Grid	$Esfuerzo [MPa] = 17.08 - 1.7 \text{ Altura de capa} + 0.0309 \text{ Relleno}$
Zigzag	$Esfuerzo [MPa] = 17.05 - 1.7 \text{ Altura de capa} + 0.0309 \text{ Relleno}$

Tabla 4.9. Ecuación de regresión lineal para módulo de Young

Geometría	Ecuación lineal
Cúbica	$M. Young [GPa] = 1.941 - 0.47 \text{ Altura de capa} + 6.9 \times 10^{-3} \text{ Relleno}$
Grid	$M. Young [GPa] = 1.633 - 0.47 \text{ Altura de capa} + 6.9 \times 10^{-3} \text{ Relleno}$
Zigzag	$M. Young [GPa] = 1.463 - 0.47 \text{ Altura de capa} + 6.9 \times 10^{-3} \text{ Relleno}$

Tabla 4.10. Ecuación de regresión lineal para deformación

Geometría	Ecuación lineal
Cúbica	$Deformación [mm/mm] = 0.01834 - 1.68 \times 10^{-3} \cdot \text{Altura de capa}$
Grid	$Deformación [mm/mm] = 0.01864 - 1.68 \times 10^{-3} \cdot \text{Altura de capa}$
Zigzag	$Deformación [mm/mm] = 0.01274 - 0.00168 \cdot \text{Altura de capa}$

4.2 Comportamiento en tracción

Las propiedades mecánicas finales de los MC reforzados con fibras dependen directamente de las propiedades de los materiales que lo componen, así como de la proporción en volumen de cada uno de ellos en el material. Sin embargo, en piezas elaboradas mediante MA, influyen también otros factores, tal como lo han comprobado diferentes investigaciones, donde estudian los diferentes efectos de espesor de capa, densidad de relleno y orientación de impresión[74], [75].

En este estudio se presenta el análisis del comportamiento mecánico a tracción de piezas utilizando la MA a través de la técnica de MDF con respecto al material termoplástico más ampliamente utilizado en esta técnica que es el PLA.

Adicionalmente se analizan los efectos en el rendimiento mecánico de los factores altura de la capa, la densidad del relleno y geometría de impresión.

4.2.1 Comportamiento mecánico en tensión.

En la Figura 4.7 se muestran las curvas de esfuerzo vs. deformación promedio para las muestras de PLA reforzado con fibras de bambú para cada una de las combinaciones planteadas en el diseño de experimentos. Se ensayaron cinco muestras de cada combinación y se promediaron los resultados para llegar a las gráficas presentadas en este capítulo. En las curvas se aprecia el comportamiento de diferentes curvas de acuerdo con las diferentes combinaciones planteadas.

De las curvas promedio presentadas en la Figura 4.7 se aprecia, para las diferentes combinaciones, una tendencia a fallar con ductilidad, esto era de esperarse debido a que los termoplásticos vítreos son frágiles a bajas temperaturas pero se convierten en dúctiles al aumentar la temperatura y presentan un comportamiento plástico antes de romperse [17], Véase en el Anexo B las propiedades a tensión más relevantes de cada probeta ensayada, en dónde para cada muestreo se presentan su promedio y desviación estándar.

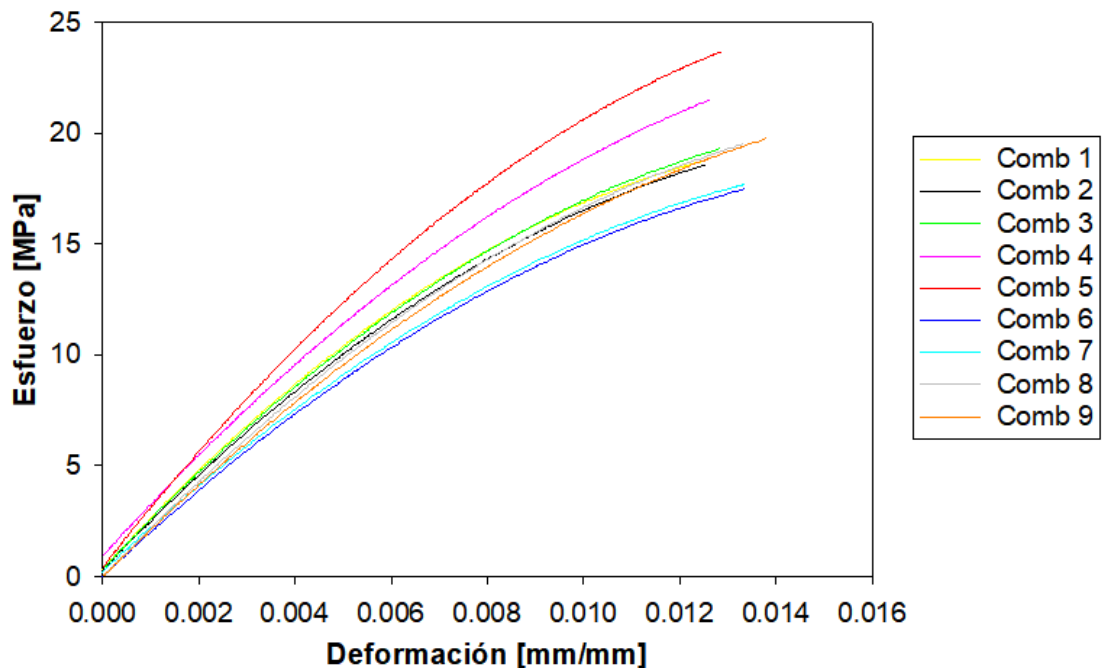


Figura 4.7. Curva promedio Esfuerzo vs Deformación de los compuestos PLA reforzado con fibras de bambú.

Se observa que, para todas las combinaciones estudiadas, se presenta una disminución notable en la deformación de rotura. Sin embargo, esta disminución va compensada con un aumento en el módulo de elasticidad (evidenciado en la pendiente de las rectas), que es la medida cuantitativa de la rigidez. A continuación, se presenta el análisis de la variación de las principales propiedades obtenidas en este ensayo a partir de la síntesis de los resultados experimentales.

4.2.2 Esfuerzo último de tensión.

En el diagrama de barras de la Figura 4.8 se presenta el esfuerzo máximo promedio a la tensión para las diferentes combinaciones planteadas en el diseño de experimentos del material ensayado. Cada una de las barras corresponden al promedio de las cinco (5) probetas manufacturadas aditivamente con sus respectivas desviaciones estándar.

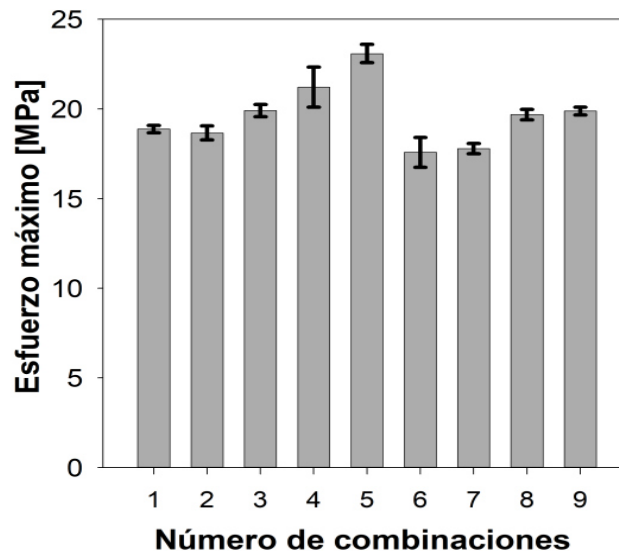


Figura 4.8. Esfuerzo Máximo promedio

En la gráfica anterior se muestran los resultados experimentales para las combinaciones de parámetros de proceso planteadas. Se observa que se registró un mayor esfuerzo ultimo a tensión para el experimento número 5; cuyos niveles son cúbica, 0.15 mm y 100 %, correspondientes a los factores de geometría, altura de capa y densidad de relleno, respectivamente.

Tomando la definición de MC que sus propiedades finales dependen de las propiedades de los materiales que lo conforman y de la proporción en que estos se encuentren. Sin embargo, en la revisión bibliográfica se encontró que la resistencia de la fibra bambú y el PLA, superan los valores obtenidos del material compuesto evaluado en el orden de 96 % y 43 %, respectivamente.

De acuerdo con el párrafo precedente, no se observa un incremento en su resistencia a tracción con la adición de un refuerzo del 20 % fibras de bambú. En este orden de ideas, se parte de la hipótesis que el material de refuerzo en el PLA no fue perfectamente impregnado por esta última y se presenta poca adhesión entre ambos materiales, lo que coincide con algunas teorías presentadas por otros investigadores que afirman que las fibras naturales son de naturaleza hidrófila y cuentan con poca resistencia a la humedad e incompatibilidad con polímeros hidrófobos. Esta incompatibilidad da como resultado una interfaz débil entre los materiales, que a su vez conduce a reducir las propiedades mecánicas de los compuestos [29], [76].

Sin embargo, diferentes investigadores han realizado estudios relacionados con los efectos de algunos parámetros de proceso durante la manufactura de las piezas a través de la técnica de MDF que influyen en las propiedades mecánicas finales del material [77].

4.2.3 Módulo elástico

En la Figura 4.9 se muestra en promedio el módulo elástico de cada combinación con sus respectivas desviaciones estándar.

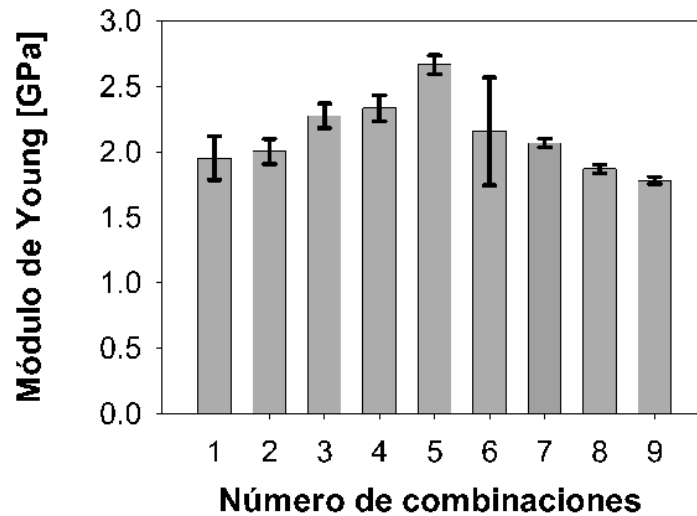


Figura 4.9. Módulo de Young promedio.

De la gráfica anterior se observa que, cuando se utiliza fibra de bambú como material adicionado a la matriz PLA, el módulo de elasticidad tiende variar significativamente. Para las muestras de las combinaciones 1 hasta 3, aumentaron el módulo elasticidad en proporciones de 1.46 %, 4.1% y 18.22 %, respectivamente. Las combinaciones 4, 5 y 6 presentaron incrementos significativos de 21.24 %, 38.44 % y 12.06 %, respectivamente. Por otro lado, la combinación 7 presentó un aumento poco significativo de 7.44 %, si se compara con las demás combinaciones. Y por último, las combinaciones 8 y 9 presentaron una ligera disminución de 2.84 % y 7.43 %.

4.2.4 Deformación máxima.

La deformación máxima promedio de las probetas se muestran en la Figura 4.10. Si bien la combinación nueve (9) fue la que obtuvo una mayor deformación con un valor de 0.0138 mm/mm, la diferencia entre todas las combinaciones ensayadas muestra una variación aproximadamente del 1 % en su deformación.

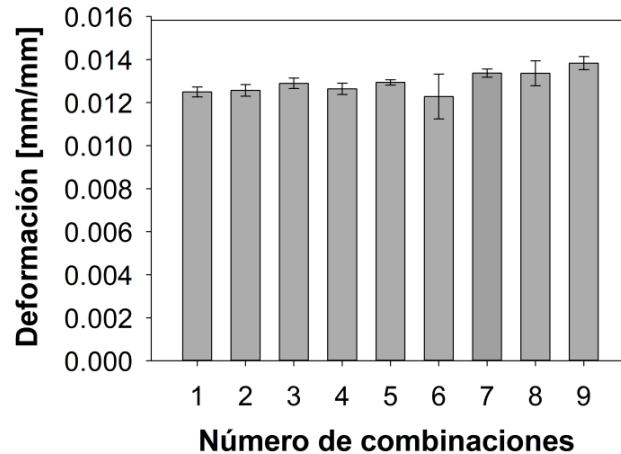


Figura 4.10. Deformación máxima promedio

Estos resultados indican la posibilidad de que el material compuesto ha presentado una adhesión débil entre fibra/matriz. Se puede suponer que, durante la extrusión del material, se crearon espacios vacíos dentro del mismo; los cuales se convierten en concentradores de esfuerzos y potencializan la iniciación y crecimiento de grietas generadas durante el ensayo. Estas grietas logran alcanzar una longitud crítica, conllevando al MC en estudio a presentar una rotura súbita. Las grietas se desplazan libremente puesto que las fibras no están aportando rigidez ni resistencia al material y, además, no se transmite la carga de manera adecuada entre las fibras y la matriz.

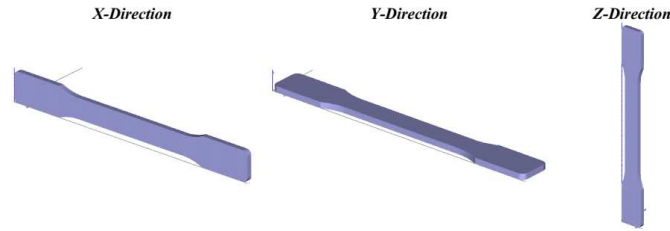
De acuerdo al análisis de los efectos principales de la respuesta de salida de las propiedades mecánicas del material compuesto manufacturado aditivamente, es posible decir que los factores establecidos no influyen positivamente en el resultado del esfuerzo y deformación, Sin embargo, las piezas manufacturadas presentaron un aumento en la elasticidad del material compuesto estudiado, algunos autores atribuyen este comportamiento al grado de impresora utilizado, es decir, grado de consumidor frente a grado industrial. En resinas, una resolución más alta igual a una tensión final más alta [78].

Lo anterior justifica la varianza de las geometrías de esta investigación ya que estas no se ajustaron al diseño planteado en el software. Esto indica un posible error en la incertidumbre de medida del equipo utilizado o contracción del material que evita

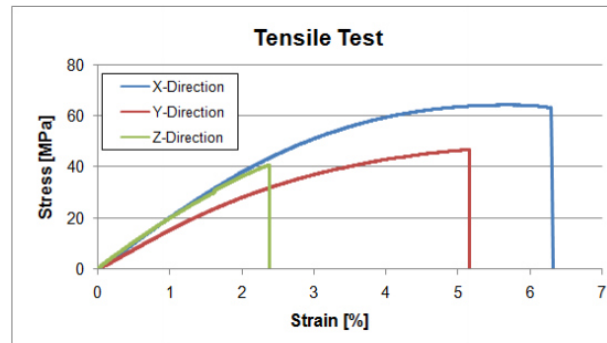
obtener una representación real de la pieza con precisión. Lo que pudo llevar a la muestra a una rotura súbita.

Luego de las consideraciones anteriores, resulta oportuno decir que existen otras posibles causas que podrían haber afectado los resultados tales como la dirección de la geometría durante la elaboración de las piezas, como lo explican Bagsik et al [60] quienes estudiaron el comportamiento de tracción del polímero ULTEM 9085 y concluyeron que los resultados a tracción presentaron una dependencia de la geometría con respecto a la orientación de fabricación. La Figura 4.11 muestra las orientaciones de construcción de las probetas y las curvas de esfuerzo - deformación resultantes.

De acuerdo con los autores anteriores, las piezas fabricadas en esta investigación se manufacturaron en dirección Y, esto indica que si se construye en otras direcciones sería posible obtener mejores propiedades mecánicas.



a) Orientaciones de construcción de las probetas



b) Curvas de esfuerzo - deformación

Figura 4.11. a) Orientaciones de construcción de las probetas y b) las curvas de esfuerzo - deformación resultantes.

Es evidente el incremento de esfuerzo y módulo de Young a medida que aumentaba el porcentaje de relleno en la muestra. Esto es lo esperado de acuerdo a diferentes autores [75], [79], debido a que la geometría interna de las piezas pueden comportarse como pequeñas huecos o nucleaciones de grietas y llevar a la muestra a una fractura súbita-

Por otro lado, la orientación vertical de las capas perpendiculares a la tensión provoca la ruptura prematura de la muestra de prueba. Esto es debido a la tensión se revierte en la interfaz entre las capas, es decir, el área más débil en las piezas obtenidas mediante la fabricación aditiva.

Además, las capas tienen un papel importante en los resultados debido a que al aumentar la altura de capa se obtiene mejor propiedad mecánica. Al aumentar la altura de capa, también aumentamos el ancho del filamento y se reduce el número de uniones entre capas, lo que nos permitiría obtener menos concentradores de esfuerzos y finalmente obtener una mayor resistencia. También es posible decir que

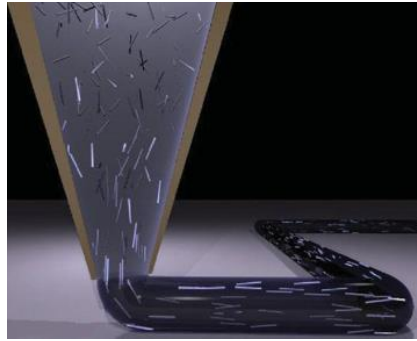
a mayor altura de capa se somete al material a mayor tiempo de enfriamiento lo que nos puede decir es que se tendría una mayor adhesión entre las capas.

Los tiempos de enfriamiento, mejor conocidos como gradientes de temperatura, favorecen al material debido a que aligeran posibles tensiones residuales internas lo contrario a un enfriamiento rápido producen estas tensiones en el material compuesto.

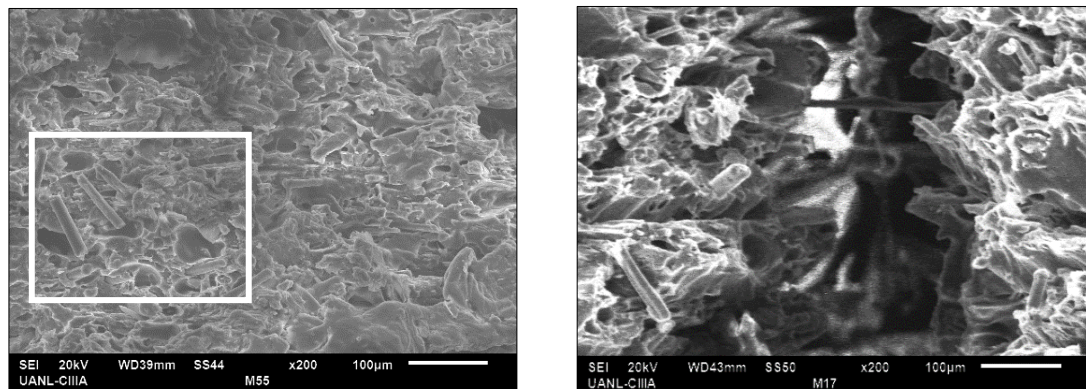
4.3 Microscopia de barrido SEM

Con el ánimo de estudiar más de cerca el comportamiento de la interface entre la fibra y la matriz, las probetas ensayadas a tracción, fueron llevadas a un microscopio electrónico de barrido (SEM) en la Universidad Autónoma de Nuevo León en el Centro de Investigación e Innovación de Ingeniería Aeronáutica en el laboratorio de análisis de falla en el equipo JEOL JSM-6510LV [80]. Las muestras fueron cortadas y recubiertas con oro antes del análisis.

En la *Figura 4.12* se aprecia que las fibras están ubicadas en la matriz en dirección axial de la extrusión como se indica en la *Figura 4.12- a)* respecto al área de corte de la probeta y su orientación diferente al sentido de aplicación de la carga, lo cual proporcionó una menor disipación de energía. Es posible observar que existe poca adherencia entre el PLA y la fibra de bambú, lo cual permitió desprendimiento por parte de las fibras. Este fenómeno de falla se puede asociar a la presencia de burbujas, grietas y deformaciones locales, ya que una fisura externa o un defecto interno puede provocar una falla antes de que alcance su resistencia máxima.



a) Ilustración esquemática de la alineación progresiva de rellenos de alta relación de aspecto dentro de la boquilla durante la deposición del compuesto [50]



b) Imágenes SEM

Figura 4.12. Dirección y orientación de fibra.

La poca adhesión entre las fibras y el PLA se puede observar en las Figuras 4.13 y 4.14 es evidente el deslizamiento de las fibras y el espaciamiento entre la matriz el material de refuerzo utilizado, lo que conlleva finalmente a la falla y que las fibras no tengan un comportamiento de refuerzo si no de un concentrador de esfuerzos. Esto puede ser debido a la falta de un tratamiento superficial de la fibra para eliminar hemicelulosa, lignina, pectina, en general material que cubre la fibra como ceras y aceites, provocando una disminución en la capacidad de transferir los esfuerzos aplicados.

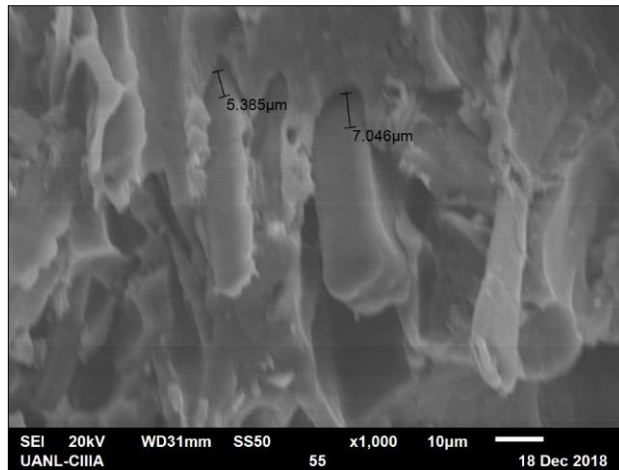


Figura 4.13. Deslizamiento de las fibras.

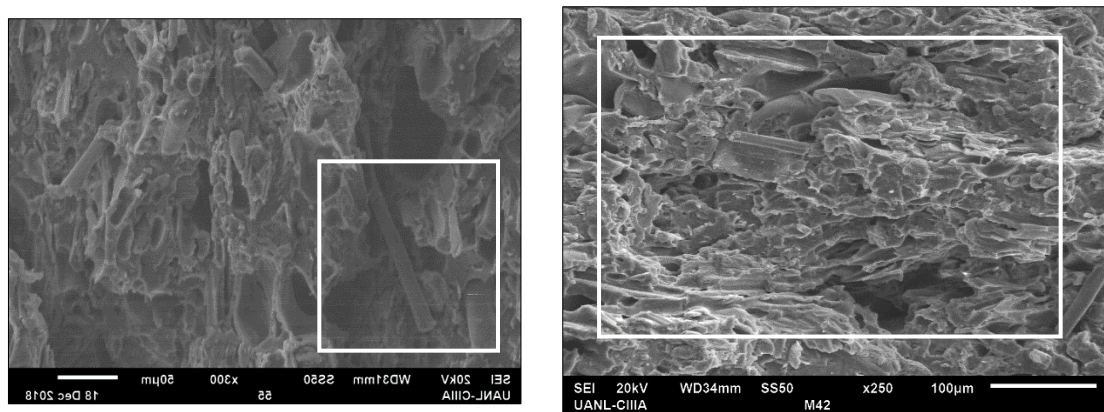


Figura 4.14. Espacio entre la matriz el material de refuerzo.

En las muestras se evidencia poca distribución de la fibras en la matriz y carencia de absorcion de la fibra en la matriz; esto se puede verificar en la ligera separacion entre las interfaces de la fibra y matriz, ademas las superficies de las fibras brindan una apariencia limpia (sin residuos de PLA) y el polímero no presenta deformaciones alrededor de las fibras. Lo anterior demuestra que existe una baja adhesión entre las fibras y matriz, lo que establece una baja resistencia de la matriz a la extracción de la fibras , de acuerdo a que las fibras extraidas de la matriz no sufrieron daños por el alto esfuerzo cortante que se produce en los procesos de mezcla y extrusión, ya que poseen longitudes similares a las condiciones iniciales. Sin embargo, existen otros factores que llevaron a una falla catrastofica en el compuesto, como se muestran en la Figuras 4.15 al 4.18.

Por otra parte, la Figura 4.15 se aprecia dos grietas a lo largo del área de estudio que probablemente se iniciaron en una cavidad existente desde su inicio (antes del ensayo mecánico) que se encuentran representado en la imagen en un círculo blanco. estas grietas se ven desplazadas a lo largo de las capas.

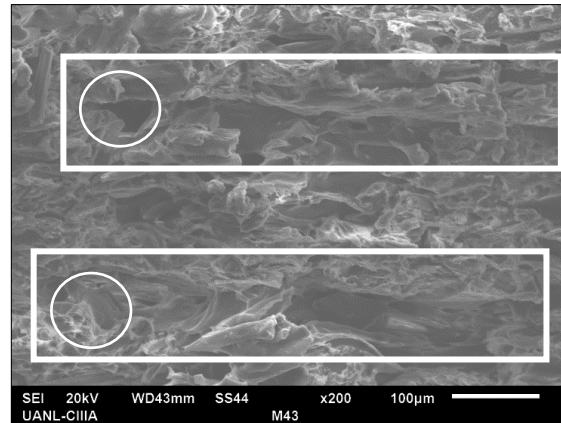


Figura 4.15. Grietas en el material.

En la *Figura 4.18* se presentan unas flechas de color blanco que señala unos puntos negros que indican los huecos y poros, en la superficie del área de falla, fueron provocados a partir de la extracción de la fibras durante la aplicación de la carga durante el ensayo mecánico y no durante el proceso de manufactura de las piezas. Debido a que durante el proceso experimental la porosidad del proceso tendió a mostrar diferencias morfológicas superficiales en la matriz y solo se observó en algunas de las primeras muestras extruidas. Lo que permite hablar de posibles acumulaciones de estos y crear un concentrador de esfuerzos y el material no alcanza a su resistencia máxima.

Por otra parte también se presentaron pequeñas fracturas internas, como se muestra en la imagen que tiene zoom, lo que significa que esta pieza sí presentó una buena adhesión de las capas impresas, de hecho es posible apreciar al fondo una fibra que aun hace resistencia a la separación.

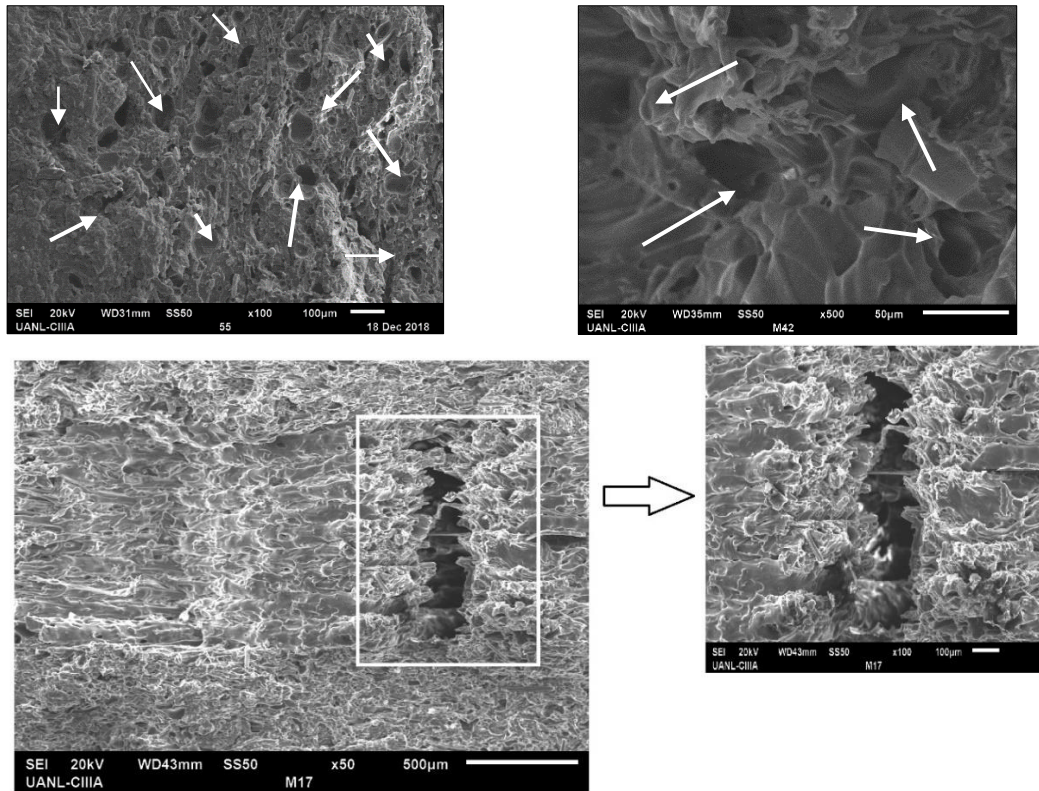


Figura 4.16. Poros en el material.

Durante el análisis de fractura en las zonas de falla de las muestras, se encontraron evidencia de deslizamiento de capas a través del material y un desprendimiento de capas, indicando una adhesión débil entre capas dentro del MC. Este fenómeno es conocido como delaminación de capas generadas luego de la fabricación. Tensiones internas, dilatación temida, retracción y humedad. Es importante recordar ya que este material compuesto es 100% natural tiende a la absorción de humedad.

La delaminación presentada en estos compuestos pueden ser un factor importante en la falla del material, debido a que la mala adhesión de capas permite la precipitación de grietas en el material llevado lo a una fractura súbita.

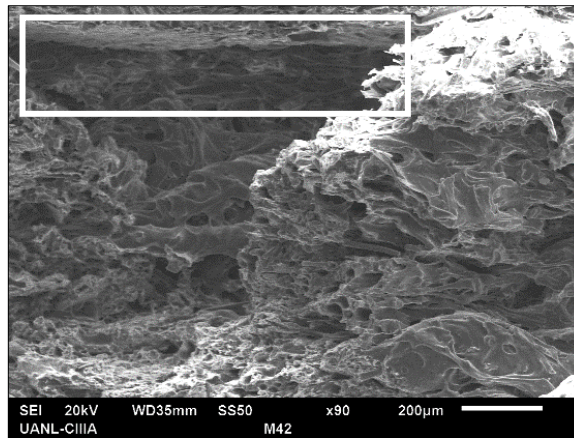


Figura 4.17. Deslizamiento de capa en el material.

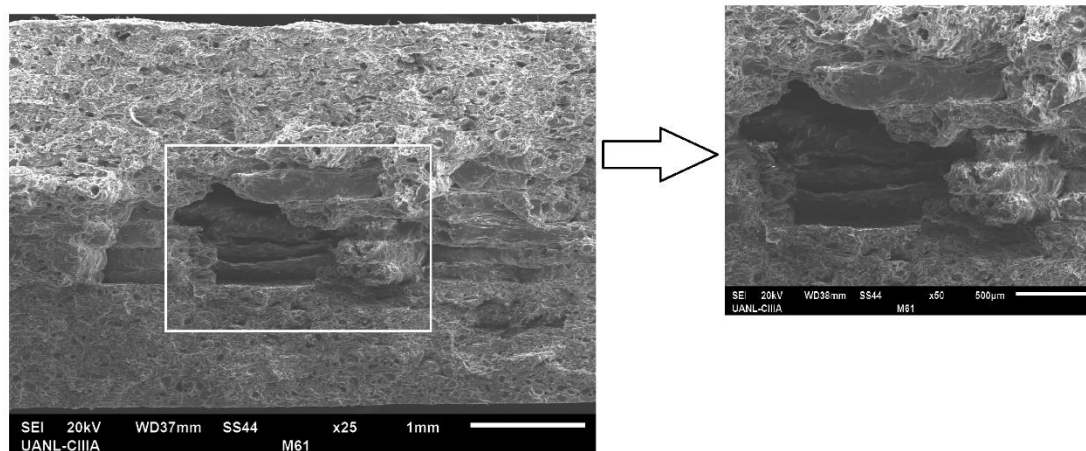


Figura 4.18. Adhesión entre capa en el material.

Los resultados del estudio fractográfico realizado son coherentes con las propiedades mecánicas observadas en los materiales sometidos al ensayo a tracción; donde se explican los valores de resistencia obtenidos en las muestras del compuesto con fibras de bambú. Adicionalmente, se hallaron unos valores relativamente bajos comparados con los valores suministrados por diferentes fabricantes de PLA, lo cual permite deducir que, en los MC ensayados bajo tracción, la interfase no es lo suficientemente resistente; de manera que el fallo mecánico se produce entre el refuerzo/matriz y entre capas (fallo adhesivo). Este comportamiento hace que la transferencia de las propiedades del refuerzo a la matriz no sea efectiva.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En esta investigación se llevó a cabo una caracterización mecánica de un material compuesto de matriz de ácido poliláctico PLA reforzado con un 20% en masa de fibra de bambú. Los MC se fabricaron de acuerdo con un diseño ortogonal L9 de Taguchi con tres factores y tres niveles, para observar los efectos principales que influían en el material construido mediante manufactura aditiva. Finalmente, las muestras se sometieron a ensayo mecánico a tracción, de acuerdo con la norma estándar ASTM D638. Las conclusiones de esta investigación son las siguientes:

- El factor de estrategia de deposición con geometría cúbica presenta un incremento del 1.6% con respecto a la media de los datos, las estrategias grid y zigzag presentaron una disminución de 0.73 % y 0.81 %, respectivamente. Es evidente que el nivel con mayor efecto sobre la respuesta de salida es la estrategia de deposición con geometría cúbica.
- La altura de capa con valores de 0.10 mm y 0.20 mm presentaron una disminución de esfuerzo último de 0.58 % y 0.81 %, respectivamente. Mientras que para una altura de capa de 0.15 mm presenta un incremento de 1.39%.
- La densidad de relleno, con valores de 75 % y 100 %, afectó la respuesta media del esfuerzo último con incrementos de relleno de 0.54 % y 0.96 %, respectivamente. Por otro lado, cuando la densidad de relleno se encuentra al 50 %, tiende a disminuir la resistencia del MC en un 1.55 %.

- Se observó un mayor esfuerzo último a tensión para la combinación número 5 el cual se caracteriza por poseer una geometría, altura de capa y densidad de relleno con valores de cúbica, 0.15 mm y 100 %, respectivamente.
- Los factores y niveles analizados en el diseño de experimentos no muestran una influencia significativa en los resultados obtenidos del ensayo a tracción para el esfuerzo último.
- Los factores que tienen influencia en la elasticidad son la geometría y la densidad del relleno. Estos resultados se obtuvieron con un nivel de confianza de 95 %.
- La deformación no presentó ninguna influencia de los factores y niveles estudiados.
- En los resultados de las propiedades mecánicas analizadas fue evidente que la resistencia de la fibra bambú y el PLA, superan los valores obtenidos del material compuesto evaluado en el orden de 96 % y 43 %, respectivamente.
- Las geometrías establecidas no se ajustaron al diseño planteado. Esto indica un error de medida del equipo utilizado para lograr una representación real de la pieza con precisión.
- La orientación vertical de las capas perpendiculares a la fuerza provoca la ruptura prematura de la muestra de prueba. Esto es debido a la tensión se revierte en la interfaz entre las capas, es decir, el área más débil en las piezas obtenidas mediante la fabricación aditiva.
- Las fibras en el compuesto se encuentran distribuidas en dirección a la extrusión del filamento en el área de corte de la probeta y su orientación diferente al sentido de aplicación de la carga, lo cual proporcionó una menor disipación de energía

- El material compuesto presentó poca adherencia entre el PLA y la fibra de bambú, lo cual permitió desprendimiento por parte de las fibras. Este fenómeno de falla se puede asociar a la presencia de burbujas, grietas y deformaciones locales.
- Las fibras no presentaron comportamiento de refuerzo si no de un concentrador de esfuerzos. Esto puede ser debido a la falta de un tratamiento superficial apropiado para eliminar hemicelulosa, lignina, pectina, ceras y aceites material que cubre la fibra.
- El compuesto evidenció el deslizamiento de capas y poca adhesión entre las capas del material lo que remitió a agrupación de grietas causando una zona concentradora de esfuerzos.
- Las muestras ensayados bajo tracción revelan que la interfaz no es lo suficientemente resistente, de manera que el fallo mecánico se produjo entre el refuerzo/matriz y capas que conforman la pieza (fallo adhesivo). Este comportamiento hace que la transferencia de las propiedades del refuerzo a la matriz no sea efectiva
- Las fibras vegetales pueden ser utilizadas como fase de refuerzo en MC de matriz PLA en aplicaciones donde no se requieran altas prestaciones mecánicas y se desee un alto valor estético, (valores de módulo de elasticidad inferiores a 2.6 GPa).

5.2 Recomendaciones

A continuación, se mencionan una serie de recomendaciones cuya implementación son necesarios para obtener mejoras en material compuesto evaluado en este proyecto y promover la producción sostenible de MC que pueden ser utilizados en la industria aeronáutica.

- En vista del bajo rendimiento de la interfaz fibra/matriz presentado en esta investigación, se plantea a modo de estudio la influencia de diferentes tratamientos superficiales para la fibra de bambú procedente de la región y de esta manera encontrar una interacción fibra/matriz óptima.
- Analizar las posibilidades de crear filamento de PLA/fibra de bambú a través del Filabot® [57], para obtener un mayor porcentaje en masa de fibra y asegurar un material con mayor continuidad o realizar el compuesto a través de la técnica de extrusor por pasta para obtener un material sin vacíos y mejor adhesión entre las capas.
- Incluir altura de capas con un 50 -80% del diámetro de la boquilla para obtener menor cantidad de capas y así garantizar una efectiva transferencia de las propiedades del refuerzo a la matriz.
- Incorporar al conjunto de factores analizados, ángulos de impresión en lugar de geometrías para establecer los efectos principales.

REFERENCIAS

- [1] P. Luna, J. Lizarazo-Marriaga, y A. Mariño, «Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: An exploratory study», *Constr. Build. Mater.*, vol. 116, pp. 93-97, jul. 2016.
- [2] A. Pozo Morales, A. Güemes, A. Fernandez-Lopez, V. Carcelen Valero, y S. De La Rosa Llano, «Bamboo–Polylactic Acid (PLA) Composite Material for Structural Applications», *Materials*, vol. 10, n.º 11, p. 1286, nov. 2017.
- [3] P. Balakrishnan, M. J. John, L. Pothan, M. S. Sreekala, y S. Thomas, «12 - Natural fibre and polymer matrix composites and their applications in aerospace engineering», en *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 365-383.
- [4] A. V. Ratna Prasad y K. Mohana Rao, «Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: Jowar, sisal and bamboo», *Mater. Des.*, vol. 32, n.º 8-9, pp. 4658-4663, sep. 2011.
- [5] M. John y S. Thomas, «Biofibres and biocomposites», *Carbohydr. Polym.*, vol. 71, n.º 3, pp. 343-364, feb. 2008.
- [6] T. Subash y S. N. Pillai, «Bast fibers reinforced green composites for aircraft indoor structures applications: review», n.º 7, p. 3, 2015.
- [7] F. S. Tong, S. C. Chin, S. I. Doh, y J. Gim bun, «Natural Fiber Composites as Potential External Strengthening Material – A Review», *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 10, n.º 2, ene. 2017.
- [8] C. Cortés Rodríguez, G.R., «LOS BAMBÚES NATIVOS DE MÉXICO», p. 4, 2000.
- [9] K. Pitt, O. Lopez-Botello, A. D. Lafferty, I. Todd, y K. Mumtaz, «Investigation into the material properties of wooden composite structures with in-situ fibre reinforcement using additive manufacturing», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 138, pp. 32-39, ene. 2017.
- [10] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, y R. C. Advincula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers», *Addit. Manuf.*, vol. 20, pp. 44-67, mar. 2018.

- [11] R. Hague, S. Mansour, y N. Saleh, «Design opportunities with rapid manufacturing», *Assem. Autom.*, vol. 23, n.º 4, pp. 346-356, dic. 2003.
- [12] Arias M. Luz Stella y segundo ;Vanegas U. Libardo, «Falla de Los Materiales Compuestos Laminados», *Revista Scientia et Technica*, 2004. [En línea]. Disponible en: revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/download/7215/4251. [Accedido: 21-mar-2018].
- [13] A. Besednjak y A. B. Dietrich, *Materiales Compuestos*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2005.
- [14] Alejandro Besednjak Dietrich, *Materiales Compuestos Procesos de fabricación de embarcaciones*, UPC, 2005. Barcelona: Quality Impress,S.L.
- [15] J. D. T. Taborda, «Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio», p. 116, 2014.
- [16] M. B. Rico y A. M. Gomis, *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Universidad de Alicante, 2012.
- [17] W. D. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverte, 2002.
- [18] J. L. Dávila *et al.*, *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales*. quito/ imprefepp/ 2011, 2011.
- [19] D. Hull, *Materiales compuestos*. Reverte, 1987.
- [20] Soheli Rana y Raul Figueiro, *Recent Advances in Smart Self-healing Polymers and Composites*. Elsevier, 2015.
- [21] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1999.
- [22] National Aeronautics and Space Administration «Investigación aeronáutica abordo de la NASA décadas de colaboración con l aviación general». . https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/ga_litho_10_09_08_Spanish_1.pdf f. Accedido 1001/2019.
- [23] C. E. Harris, J. H. Starnes, y M. J. Shuart, «Design and Manufacturing of Aerospace Composite Structures, State-of-the-Art Assessment», *J. Aircr.*, vol. 39, n.º 4, pp. 545-560, jul. 2002.
- [24] P. P. Martin, «(54) Green aircraft interior panels (75) Inventors»:., p. 18.2012

- [25] F. B. Robledo, «Fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales mediante el método de prensado en frío para aplicaciones aeronáuticaS», p. 103. 2016
- [26] A. K. Mohanty, M. Misra, y L. T. Drzal, Eds., *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005.
- [27] D. B. Dittenber y H. V. S. GangaRao, «Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure», *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, n.º 8, pp. 1419-1429, ago. 2012.
- [28] P. K. Mallick, «Fiber-Reinforced Composites», Department of Mechanical Engineering. University of Michigan Dearborn, p. 138. 2007
- [29] M. Jawaid y H. P. S. Abdul Khalil, «Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review», *Carbohydr. Polym.*, vol. 86, n.º 1, pp. 1-18, ago. 2011.
- [30] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Y. Liu, G. C. Yang, y H. M. Zeng, «The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, n.º 10, pp. 1437-1447, ago. 2001.
- [31] G. Cicala, G. Cristaldi, G. Recca, y A. Latteri, «Composites Based on Natural Fibre Fabrics», en *Woven Fabric Engineering*, P. Dobnik, Ed. Sciyo, 2010.
- [32] S. Kalia, B. S. Kaith, y I. Kaur, «Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review», *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, n.º 7, pp. 1253-1272, jul. 2009.
- [33] N. Banik, V. Dey, y G. R. K. Sastry, «An experimental assiduity on the dominance of process parameters on mechanical properties for making a fire retardant bamboo fiber composite with the help of Taguchi experimental design», *Mater. Today Proc.*, vol. 5, n.º 2, pp. 5701-5708, 2018.
- [34] F. Wang, S. Zhou, M. Yang, Z. Chen, y S. Ran, «Thermo-Mechanical Performance of Polylactide Composites Reinforced with Alkali-Treated Bamboo Fibers», *Polymers*, vol. 10, n.º 4, p. 401, abr. 2018.
- [35] Corporación Universitaria Minuto de Dios *et al.*, «Mechanical and physical characterization of Guadua angustifolia‘Kunth’fibers from Colombia», *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, n.º 2, pp. 33-40, mar. 2018.

- [36] J. Mueller, K. Shea, y C. Daraio, «Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design», *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 902-912, dic. 2015.
- [37] B. G. Compton y J. A. Lewis, «3D-Printing of Lightweight Cellular Composites», *Adv. Mater.*, vol. 26, n.º 34, pp. 5930-5935, sep. 2014.
- [38] S. S. Muthu y M. M. Savalani, *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing: Volume 2*. 2016.
- [39] B. Kianian, *Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapters titles: The Middle East, and other countries*. Wohlers Associates, Inc., 2017.
- [40] «Wohlers Report 2016 reveals \$1 billion growth in 3D printing industry», *3ders.org*. [En línea]. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20160405-wohlers-report-2016-reveals-1-billion-growth-in-3d-printing-industry.html>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [41] M.M. Quesada, J. Estebarez, L. A. T. Mendoza . Puesta a punto de un sistema de fabricación aditiva para materiales compuestos», Universidad de Sevilla. p. 191. 2015
- [42] «Inventor of FDM 3D Printing and Co-Founder of Stratasys, Scott Crump, Inducted in to the TCT Hall of Fame», *Stratasys*. [En línea]. Disponible en: <http://investors.stratasys.com/news-releases/news-release-details/inventor-fdm-3d-printing-and-co-founder-stratasys-scott-crump>. [Accedido: 24-oct-2018].
- [43] M. Vaezi, H. Seitz, y S. Yang, «A review on 3D micro-additive manufacturing technologies», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, n.º 5-8, pp. 1721-1754, jul. 2013.
- [44] «Fused Deposition Modeling, FDM». [En línea]. Disponible en: [/en/fused-deposition-modeling-fdm](#). [Accedido: 05-dic-2018].
- [45] E. Yasa y K. Ersoy, «Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites», *Aircr. Technol.*, sep. 2018.
- [46] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, y Z. Li, «Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling», *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 301, n.º 2, pp. 125-130, mar. 2001.
- [47] «Aplicacion: Herramientas de moldeo de materiales compuestos de FDM - Stratasys - Catálogo PDF | Documentación técnica | Brochure». [En línea].

- Disponible en: <http://pdf.directindustry.es/pdf/stratasys/aplicacion-herramientas-moldeo-materiales-compuestos-fdm/25745-704358.html>. [Accedido: 06-dic-2018].
- [48] «Herramientas de materiales compuestos impresas en 3D FDM | Stratasys». [En línea]. Disponible en: <https://www.stratasys.com/es/tooling/composite-tooling>. [Accedido: 17-abr-2019].
- [49] P. Dudek, «FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements», *Arch. Metall. Mater.*, vol. 58, n.º 4, pp. 1415-1418, dic. 2013.
- [50] P. Parandoush y D. Lin, «A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites», *Compos. Struct.*, vol. 182, pp. 36-53, dic. 2017.
- [51] C. B. Díez, «Fabricación y caracterización de piezas de material compuesto realizadas en impresora 3D», Universidad de Sevilla. p. 114. 2016
- [52] M. L. Shofner, K. Lozano, F. J. Rodríguez-Macías, y E. V. Barrera, «Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling: Nanofiber-Reinforced Polymers», *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 89, n.º 11, pp. 3081-3090, sep. 2003.
- [53] S. Kumar y J.-P. Kruth, «Composites by rapid prototyping technology», *Mater. Des.*, vol. 31, n.º 2, pp. 850-856, feb. 2010.
- [54] «Markforged presenta sus impresoras 3D de carbono», *3Dnatives*, 28-nov-2016. .
- [55] «Serie Onyx y MarkTwo», *Tecsol 3D | Impresoras y Escáneres 3D en México*. [En línea]. Disponible en: <https://tecsol3d.com/es/impresoras-3d/impresoras-3d-de-escritorio/marktwo/>. [Accedido: 23-abr-2019].
- [56] «3D Printer Types & Technologies | Markforged». [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/learn/3d-printer-types-technologies/>. [Accedido: 21-may-2019].
- [57] «Filament Maker - Recycle Filament for Any 3D Printer», *Filabot*. [En línea]. Disponible en: <https://www.filabot.com/>. [Accedido: 14-mar-2019].
- [58] T. Hofstätter, D. B. Pedersen, G. Tosello, y H. N. Hansen, «Applications of Fiber-Reinforced Polymers in Additive Manufacturing», *Procedia CIRP*, vol. 66, pp. 312-316, 2017.
- [59] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, y S. Wang, «Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling», *Compos. Part B Eng.*, vol. 80, pp. 369-378, oct. 2015.

- [60] X. Yao, C. Luan, D. Zhang, L. Lan, y F. Jianzhong, «Evaluation of carbon fiber-embedded 3D printed structures for strengthening and structural-health monitoring», *Mater. Des.*, vol. 114, nov. 2016.
- [61] A. N. Dickson, J. N. Barry, K. A. McDonnell, y D. P. Dowling, «Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing», *Addit. Manuf.*, vol. 16, pp. 146-152, ago. 2017.
- [62] P. Bettini, G. Alitta, G. Sala, y L. Di Landro, «Fused Deposition Technique for Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic», *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 26, n.º 2, pp. 843-848, feb. 2017.
- [63] R. Matsuzaki *et al.*, «Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation», *Sci. Rep.*, vol. 6, n.º 1, sep. 2016.
- [64] B. Akhoundi, A. H. Behraves, y A. Bagheri Saed, «Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer», *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 38, n.º 3, pp. 99-116, feb. 2019.
- [65] K. Pandey, «Natural Fibre Composites For 3D Printing», p. 64. 2015
- [66] J. Olivas, «Airbus produce más de 1000 piezas impresas en 3D para sus aviones A350», <http://intelligy.com/>, 23-jun-2015. [En línea]. Disponible en: <http://intelligy.com/blog/2015/06/23/airbus-piezas-impresas-3D/>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [67] «3D Printing Aircraft Interiors | Aerospace 3D Printing | Stratasys Direct». [En línea]. Disponible en: <https://www.stratasysdirect.com/industries/aerospace/3d-printing-aircraft-interiors>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [68] C. B. S. A. Kumar y C.B, «La trayectoria histórica», *La Red internacional del bambú y el rotén*. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x2450s/x2450s0a.htm#TopOfPage>. [Accedido: 11-ene-2019].
- [69] S. Farah, D. G. Anderson, y R. Langer, «Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review», *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 107, pp. 367-392, dic. 2016.
- [70] States, American Society for Testing and Materials. United D20 Committee, «Test Method for Tensile Properties of Plastics», ASTM D638-10.

- [71] «Ultimaker Cura 3.0 Free, Open Source Slicing Software - Allegheny Educational Systems, Inc.» [En línea]. Disponible en: <http://www.alleghenyedusys.com/products/3d-printing-and-scanning/desktop-3d-printers/ultimaker/ultimaker-cura-30>. [Accedido: 21-ene-2019].
- [72] «Minitab». [En línea]. Disponible en: <http://www.minitab.com/es-mx/>. [Accedido: 14-mar-2019].
- [73] «¿Qué es la relación de señal a ruido en un diseño de Taguchi?» [En línea]. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/>. [Accedido: 14-mar-2019].
- [74] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, y A. Camacho, «The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis», *Materials*, vol. 11, n.º 8, p. 1333, ago. 2018.
- [75] H. Ali, T. Alani, y F. Othman, «Influence of Process Parameters on Mechanical Properties and Printing Time of FDM PLA Printed Parts Using Design of Experiment», jul. 2018.
- [76] M. J. John y R. D. Anandjiwala, «Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites», *Polym. Compos.*, vol. 29, n.º 2, pp. 187-207, feb. 2008.
- [77] S. R. Rajpurohit y H. K. Dave, «Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part», *Rapid Prototyp. J.*, p. 9.
- [78] B. Tang Dan, D. R. Khodos, O. Khairallah, R. Ramlal, y Y. Budhoo, «The Effect of the 3-D Printing Process on the Mechanical Properties of Materials», en *Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing, Volume 9*, J. Wang, B. Antoun, E. Brown, W. Chen, I. Chasiotis, E. Huskins-Retzlaff, S. Kramer, y P. R. Thakre, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 91-99.
- [79] Rodríguez. B et al «Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM». Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona 2017.
- [80] «JSM-6510 Series Scanning Electron Microscope | Products | JEOL Ltd.» [En línea]. Disponible en: <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-6510series.html>. [Accedido: 17-abr-2019].

ANEXOS

Anexo A: Propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales

Tabla A.1. Propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales [27]

Tipo de fibra	Densidad [g/cm ³]	Longitud [mm]	Diámetro [µm]	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de tracción [GPa]	Módulo específico (arecos)	Alargamiento [%]	Celulosa [wt. %]	Hemicelulosa [wt. %]	Lignina [wt. %]	Pectina [wt. %]	Ceras [wt. %]	Ángulo microfibrilar [deg]	Contenido de humedad [wt. %]
Vidrio-E	2,5-2,59	-	<17	2000-3500	70-76	29	1,8-4,8	-	-	-	-	-	-	-
Abacá	1,5	-	-	400-980	6,2-20	9	1,0-10	56-63	20-25	7,0-13	1	3	-	5,0-10
Alfa	0,89	-	-	35	22	25	5,8	45,4	38,5	14,9	-	2	-	-
Bagazo	1,25	10-300	10,0-34	222-290	17-27,1	18	1,1	32-55,2	16,8	19-25,3	-	-	-	-
Bambú	0,6-1,1	1,5-4	25-40	140-800	11,0-32	25	2,5-3,7	26-65	30	5,0-31	-	-	-	-
Banana	1,35	300-900	12,0-30	500	12	9	1,5-9	63-67,6	10,0-19	5	-	-	-	8,7-12
fibra de coco	1,15-1,46	20-150	10-460	95-230	2,8-6	4	15-51,4	32-43,8	0,15-20	40-45	3-4,0	-	30-49	8
Algodón	1,5-1,6	10,0-60	10,0-45	287-800	5,5-12,6	6	3-10,0	82,7-90	5,7	<2	0-1	0,6	-	7,85-8,5
Caraíba	1,4	35	7-10,0	87-1150	11,8-96	39	1,3-4,9	70,7-73,6	9,9	7,5-11,1	-	-	-	-
Lino	1,4-1,5	5-900	12-600	343-2000	27,6-103	45	1,2-3,3	62-72	18,6-20,6	2,0-5	2,3	1,5-1,7	5,0-10	8,0-12
Cáñamo	1,4-1,5	5,0-55	25-500	270-900	23,5-90	40	1-3,5	68-74,4	15-22,4	3,7-10	0,9	0,8	2-6,2	6,2-12
Huesque	1,2	-	-	430-570	10,1-16,3	11	3,7-5,9	60-77,6	4,0-28	8-13,1	-	0,5	-	-
Isora	1,2-1,3	-	-	500-600	-	-	5-6,0	74	-	23	-	1,09	-	-
Yute	1,3-1,49	1,5-120	20-200	320-800	8,0-78	30	1-1,8	59-71,5	13,6-20,4	11,8-13	0,2-0,4	0,5	8	12,5-13,7
Kenaf	1,4	-	-	223-980	14,5-53	24	1,5-2,7	31-72	20,3-21,5	8,0-19	3-5,0	-	-	-
Ortiga	-	-	-	650	38	-	1,7	86	10	-	-	4	-	11,0-17
Acite de palma piassava	0,7-1,55	-	150-900	80-248	0,5-3,2	2	17-25	60-65	-	11,0-29	-	-	42-46	-
piassava	1,4	-	-	134-143	1,07-4,59	2	7,8-21,9	28,6	25,8	45	-	-	-	-

Anexo B: Propiedades mecánicas a tensión de las diferentes combinaciones

Tabla A.2. Propiedades mecánicas de las combinaciones 1 hasta 4.

Combinación 1			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBG11	1.877	0.012554223	18.82430001
PBG12	1.8	0.012769724	18.96457111
PBG13	1.881	0.012524776	18.54127331
PBG14	1.98	0.012482581	19.03043321
PBG15	2.227	0.012134684	19.00206308
Desviación Estándar	0.1660	0.0002	0.2014
Media	1.9530	0.0125	18.8725
Combinación 2			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBG21	2.161	0.012143113	18.5159071
PBG22	2.012	0.012454079	18.47086775
PBG23	1.952	0.012746538	19.05508159
PBG24	1.983	0.012690465	19.06849218
PBG25	1.91	0.012797701	18.18537897
Desviación Estándar	0.0958	0.0003	0.3888
Media	2.0036	0.0126	18.6591
Combinación 3			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBG31	2.402	0.012612206	19.77300205
PBG32	2.188	0.012826361	19.36021266
PBG33	2.346	0.013064795	20.21039151
PBG34	2.227	0.012765356	20.03460197
PBG35	2.215	0.013217786	20.14760976
Desviación Estándar	0.0931	0.0002	0.3475
Media	2.2756	0.0129	19.9052
Combinación 4			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBC41	2.214	0.01272309	20.36214847
PBC42	2.26	0.012868241	20.63422055
PBC43	2.36	0.012779733	22.23467946
PBC44	2.373	0.012197852	20.2453726
PBC45	2.463	0.012645435	22.60830573
Desviación Estándar	0.0984	0.0003	1.1165
Media	2.3340	0.0126	21.2169

Tabla A.3. Propiedades mecánicas de las combinaciones 5 hasta 8.

Combinación 5			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBC51	2.612	0.0130171	22.8655086
PBC52	2.614	0.012984636	22.74253111
PBC53	2.661	0.012929805	23.95860351
PBC54	2.788	0.012732514	22.77314434
PBC55	2.65	0.013037013	23.08417584
Desviación Estándar	0.0721	0.0001	0.5064
Media	2.6650	0.0129	23.0848
Combinación 6			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBC61	1.944	0.01046572	18.73680713
PBC62	1.874	0.012514793	17.4949433
PBC63	1.959	0.012532478	18.05959043
PBC64	2.873	0.013094854	16.82866302
PBC65	2.133	0.012806455	16.78969257
Desviación Estándar	0.4117	0.0010	0.8313
Media	2.1566	0.0123	17.5819
Combinación 7			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBZ71	2.039	0.013067522	17.74646717
PBZ72	2.069	0.013368155	18.25298276
PBZ73	2.075	0.013409156	17.51368779
PBZ74	2.039	0.013583179	17.79500093
PBZ75	2.119	0.013442282	17.60990918
Desviación Estándar	0.0329	0.0002	0.2850
Media	2.0682	0.0134	17.7836
Combinación 8			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBZ81	1.829	0.012827918	19.46854431
PBZ82	1.91	0.013168909	19.72801385
PBZ83	1.815	0.014349771	19.46943461
PBZ84	1.805	0.013238701	20.17596533
PBZ85	1.992	0.013238444	19.56387963
Desviación Estándar	0.0329	0.0006	0.2961
Media	2.0682	0.0134	19.6812

Tabla A.4. Propiedades mecánicas de la combinación 9.

Combinación 9			
Probeta	Módulo de Young GPa	Deformación %	Esfuerzo máximo MPa
PBZ91	1.744	0.013706322	19.68418441
PBZ92	1.8035	0.014379789	19.84963611
PBZ93	1.775	0.013688289	20.1973346
PBZ94	1.775	0.013701024	19.68167851
PBZ95	1.812	0.013699774	19.99163483
Desviación Estándar	0.0269	0.0003	0.2190
Media	1.7819	0.0138	19.8809