



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA BIOLÓGICA Y BIOMÉDICA

INGENIERO INDUSTRIAL

TRABAJO DE TITULACIÓN

Valoración en el uso de termoplásticos reciclados como una
alternativa ambiental en la impresión 3D

Autor: Chamba Jumbo, Ronald Patricio

Director: Inga Lafebre, Jorge Daniel

LOJA - ECUADOR

2020



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2020

Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja, 27 de noviembre de 2020

Magister
Juan Diego Febres Eguiguren
Coordinador de la Titulación de Ingeniería Industrial

En su despacho. -

De mi especial consideración:

El presente trabajo de titulación denominado: Valoración en el uso de termoplásticos reciclados como una alternativa ambiental en la impresión 3D realizado por Ronald Patricio Chamba Jumbo, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Firma:

Jorge Daniel Inga Lafebre
C.I.: 1104336704

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Ronald Patricio Chamba Jumbo, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

- Ser autor del Trabajo de Titulación denominado: Valoración en el uso de termoplásticos reciclados como una alternativa ambiental en la impresión 3D, de la Carrera de Ingeniería Industrial, específicamente de los contenidos comprendidos en: Capítulo uno. Marco conceptual, Capítulo dos. Metodología de la investigación, Capítulo tres. Análisis e interpretación de resultados, Conclusiones y Recomendaciones, siendo Jorge Daniel Inga Lafebre, director del presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.
- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Autor: Ronald Patricio Chamba Jumbo

C.I: 1718261272

Dedicatoria

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad educado en valores éticos y morales. Muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que incluye este. Me formaron con reglas y algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para lograr mis anhelos. No solo me criaron de la mejor manera, no solo me han ayudado a desarrollarme como estudiante sino también me han enseñado a ser buena persona y creo que eso dice mucho de ustedes como padres.

A mis hermanos porque son la razón de sentirme tan orgulloso de culminar mis estudios, gracias a ellos por siempre confiar en mí, por estar siempre ahí en todo momento, por su gran apoyo en esta fuerte etapa de mi vida donde sobresalieron más los buenos momentos.

Este gran paso en mi vida se los dedico a ustedes mi pequeña familia, mi fuente de inspiración por brindarme tantas alegrías y acompañarme aún más en mis momentos de angustia, no sería nada sin ustedes.

Agradecimiento

A La universidad por abrirme sus puertas dándome la bienvenida al mundo como tal, y ofrecerme las oportunidades que se me han brindado que son incomparables, y antes de esto ni pensaba que fuera posible que algún día si quiera me topara con alguna de ellas.

A Dios y a la Virgen del Cisne por darme la vida, salud, sabiduría, inteligencia y el conocimiento necesario para seguir mi carrera profesional y culminarla con éxito.

A mis padres, Angel y Lida por darme la vida y haberme brindado la oportunidad de estudiar en la UTPL, por su esfuerzo y entera confianza y por ser ustedes quienes siempre me dado su apoyo incondicional. Ustedes son el pilar fundamental en mi vida que siempre me apoyaron cuando los necesité y que con sus consejos motivadores me inspiraron a ser cada día mejor persona. A mis hermanos Cristhian y Selena que de una u otra forma me apoyaron moralmente siendo una razón más para prepararme profesionalmente y ser un ejemplo para ellos a seguir y en un futuro servir a la sociedad. y a mi director de Trabajo de Titulación Ph.D. Jorge Daniel Inga Lafebre por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad, orientación y conocimiento, así como también por su entusiasmo, dedicación y por haberme guiado durante todo el desarrollo del presente trabajo.

Índice de Contenidos

| | |
|--|-----|
| Carátula | i |
| Declaración de autoría y cesión de derechos..... | iii |
| Dedicatoria | v |
| Agradecimiento..... | vi |
| Índice De Contenidos | vii |
| Resumen | 1 |
| Abstract..... | 2 |
| Introducción | 3 |
| Capítulo I | 5 |
| Marco conceptual | 5 |
| 1.1 Impresión 3D | 5 |
| 1.1.1 <i>Características de impresión 3D</i> | 7 |
| 1.1.2 <i>Diseño para la impresión en 3D</i> | 7 |
| 1.1.3 <i>Velocidad de impresión 3D</i> | 8 |
| 1.1.4 <i>Métodos de fabricación para impresión 3D</i> | 9 |
| 1.1.4.1 <i>Procesos basados en láser</i> | 9 |
| 1.1.4.2 <i>Procesos de extrusión</i> | 9 |
| 1.1.4.3 <i>Procesos de inyección</i> | 10 |
| 1.1.4.4 <i>Procesos de unión de materiales con adhesivos</i> | 11 |
| 1.1.4.5 <i>Proceso de haz de electrones</i> | 12 |
| 1.1.5 <i>Tipos de tecnologías de impresión 3D</i> | 13 |

| | | |
|----------------|--|----|
| 1.1.5.1 | Fotopolimerización | 13 |
| 1.1.5.1.1 | Sistema de Estereolitografía (SLA)..... | 13 |
| 1.1.5.1.2 | Procesamiento Digital por Luz (DLP)..... | 15 |
| 1.1.5.1.3 | Interfaz de Producción Líquida Continua (CLIP)..... | 16 |
| 1.1.5.2 | Fusión de Lecho de Polvo (PBF) | 18 |
| 1.1.5.2.1 | Sinterización Selectiva por Láser (SLS)..... | 18 |
| 1.1.5.2.2 | Multi-Jet Fusión (MJF)..... | 20 |
| 1.1.5.3 | Inyección de aglutinante (Binder Jetting) | 21 |
| 1.1.5.3.1 | Impresión Tridimensional (3DP)..... | 21 |
| 1.1.5.4 | Inyección de Material (Material Jetting) | 22 |
| 1.1.5.4.1 | PolyJet..... | 22 |
| 1.1.5.4.2 | Modelado de Chorro Múltiple (MJM)..... | 22 |
| 1.1.5.5 | Laminación de hojas | 23 |
| 1.1.5.5.1 | Fabricación de Objetos Laminados (LOM)..... | 23 |
| 1.1.5.5.2 | Fabricación Aditiva Ultrasónica (UAM)..... | 24 |
| 1.1.5.6 | Extrusión de Material | 24 |
| 1.1.5.6.1 | Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 24 |
| 1.1.5.6.2 | Modelado por Deposición Fundida (FDM)..... | 26 |
| 1.1.5.7 | Deposición Directa de Energía (DED) | 29 |
| 1.1.5.7.1 | Deposición de Metal por Láser (LMD)..... | 29 |
| 1.1.5.7.2 | Deposición Directa de Metal (DMD)..... | 30 |
| 1.1.5.7.3 | Modelado de Ingeniería Láser (LENS)..... | 31 |
| 1.2 | Tipos de materiales actualmente utilizados en impresoras 3D | 31 |

| | | |
|--|--|----|
| 1.2.1 | Polímeros | 32 |
| 1.2.1.1 | Polímeros comúnmente usados | 35 |
| 1.1.5.7.4 | Poli (tereftalato de etileno) (PET)..... | 35 |
| 1.1.5.7.5 | Polietileno de alta densidad (PEAD)..... | 37 |
| 1.1.5.7.6 | Polipropileno (PP)..... | 38 |
| 1.2.1.2 | Polímeros biodegradables en impresión 3D | 39 |
| 1.1.5.7.7 | Poli (ácido láctico) (PLA)..... | 40 |
| 1.2.1.3 | Sistema de codificación de los polímeros | 41 |
| 1.2.2 | Metales | 45 |
| 1.2.3 | Cerámica | 46 |
| 1.2.4 | Biomateriales | 47 |
| 1.2.5 | Alimentos | 48 |
| 1.3 | Uso del reciclaje de polímeros en impresoras 3D | 50 |
| 1.3.1 | Reciclaje Primario | 53 |
| 1.3.2 | Reciclaje Secundario | 54 |
| 1.3.3 | Reciclaje Terciario | 57 |
| 1.3.4 | Reciclaje Cuaternario | 57 |
| Capítulo II | | 59 |
| Metodología de la Investigación | | 59 |
| 2.1 | Convención de polímeros empleados | 59 |
| 2.2 | Tratamiento de los polímeros | 60 |
| 2.3 | Identificación de los métodos de fabricación para impresión 3D aplicados a matrices poliméricas | 61 |

| | | |
|--|--|----|
| 2.4 | Análisis bibliográfico de pruebas mecánicas | 64 |
| 2.4.1 | <i>Prueba de Tracción</i> | 64 |
| 2.4.1.1 | Módulo de Young | 65 |
| 2.4.1.2 | Resistencia a la Tracción | 65 |
| 2.4.1.3 | Elongación a la rotura | 65 |
| 2.4.2 | <i>Prueba de Flexión</i> | 65 |
| 2.4.2.1 | Módulo de Flexión | 66 |
| 2.4.2.2 | Resistencia a la Flexión | 67 |
| 2.5 | Análisis bibliográfico de pruebas térmicas | 67 |
| 2.5.1 | <i>Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)</i> | 67 |
| 2.5.1.1 | Punto de Fusión (T_m) | 67 |
| 2.5.1.2 | Temperatura de Degradación | 68 |
| 2.5.1.3 | Temperatura de Transición Vítreo (T_g) | 69 |
| Capítulo III | | 71 |
| Análisis e Interpretación de Resultados | | 71 |
| 3.1 | Propiedades mecánicas y térmicas de poli (ácido láctico) (PLA) | 71 |
| 3.1.1 | <i>Prueba de Tracción</i> | 71 |
| 3.1.2 | <i>Prueba de Flexión</i> | 73 |
| 3.1.3 | <i>Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) de poli (ácido láctico)</i> | 74 |
| 3.2 | Propiedades mecánicas y térmicas de polietileno de alta densidad (PEAD) | 75 |
| 3.2.1 | <i>Prueba de Tracción</i> | 75 |
| 3.2.2 | <i>Prueba de Flexión</i> | 76 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.3 | <i>Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para polietileno de alta densidad</i> | 77 |
| 3.3 | Propiedades mecánicas y térmicas del Polipropileno (PP) | 78 |
| 3.3.1 | <i>Prueba de Tracción</i> | 78 |
| 3.3.2 | <i>Prueba de Flexión</i> | 79 |
| 3.3.3 | <i>Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para polipropileno</i> | 80 |
| 3.4 | Propiedades mecánicas y térmicas de poli (tereftalato de etileno) (PET) | 81 |
| 3.4.1 | <i>Prueba de Tracción</i> | 81 |
| 3.4.2 | <i>Prueba de Flexión</i> | 81 |
| 3.4.3 | <i>Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para poli (tereftalato de etileno)</i> | 82 |
| 3.5 | Análisis y comparación de propiedades mecánicas y térmicas de los materiales termoplásticos | 83 |
| 3.5.1 | <i>Módulo de Young</i> | 83 |
| 3.5.2 | <i>Resistencia a la Tracción</i> | 84 |
| 3.5.3 | <i>Elongación a la rotura</i> | 85 |
| 3.5.4 | <i>Módulo de Flexión</i> | 86 |
| 3.5.5 | <i>Resistencia a la Flexión</i> | 87 |
| 3.6 | Condiciones de procesamiento de los termoplásticos reciclables | 89 |
| 3.6.1 | <i>Condiciones del procesamiento del polipropileno reciclado (rPP)</i> | 89 |
| 3.6.2 | <i>Condiciones del procesamiento del poli (tereftalato de etileno) reciclado (rPET)</i> | 90 |
| | Conclusiones | 93 |

| | |
|------------------------------|----|
| Recomendaciones | 94 |
| Referencias | 95 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Código y Características de los Polímeros para el Reciclado | 42 |
| Tabla 2 Simbología de los Materiales..... | 59 |
| Tabla 3 Tecnologías de Impresión con sus Respectivas Técnicas. | 61 |
| Tabla 4 Valores de Prueba de Tracción de Poli (Ácido Láctico) (PLA) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 73 |
| Tabla 5 Valores de Prueba de Flexión de Poli (Ácido Láctico) (PLA) impreso por la técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 74 |
| Tabla 6 Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Poli (Ácido Láctico) (PLA)..... | 75 |
| Tabla 7 Valores de Prueba de Tracción de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) | 76 |
| Tabla 8 Valores de Prueba de Flexión de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 77 |
| Tabla 9 Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) | 78 |
| Tabla 10 Valores de Prueba de Tracción de Polipropileno (PP) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) | 79 |
| Tabla 11 Valores de Prueba de Flexión de Polipropileno (PP) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 79 |
| Tabla 12 Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Polipropileno (PP)..... | 80 |
| Tabla 13 Valores de Prueba de Tracción de Poli (Tereftalato de Etileno) (PET) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Tabla 14 Valores de Prueba de Flexión de Poli (Tereftalato de Etileno) (PET) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 82 |
| Tabla 15 Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Poli (Tereftalato de Etileno (PET) | 82 |
| Tabla 16 Temperaturas de Procesamiento del Polipropileno reciclado (rPP) | 90 |
| Tabla 17 Temperaturas de Procesamiento del Poli (tereftalato de etileno) reciclado (rPET)..... | 91 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Representación Esquemática de la Impresión de un Objeto por Capas | 6 |
| Figura 2 Proceso de Extrusión, Principio y Esquema..... | 10 |
| Figura 3 Esquema del Proceso de Inyección | 11 |
| Figura 4 Proceso de Unión de Materiales con Adhesivos | 12 |
| Figura 5 Procesamiento de Haz de Electrones | 12 |
| Figura 6 Sistema de Estereolitografía | 14 |
| Figura 7 Exposición Selectiva a la Luz por un Láser vs un Sistema de Estereolitografía | 15 |
| Figura 8 Proceso de Interfaz de Producción Líquida Continua..... | 18 |
| Figura 9 Configuración de Impresión 3D para Sinterización Selectiva por Láser..... | 19 |
| Figura 10 Proceso de Impresión Tridimensional | 21 |
| Figura 11 Esquema de la Fabricación de Objetos Laminados..... | 23 |
| Figura 12 Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) | 26 |
| Figura 13 Flujo de Proceso de Impresión 3D | 27 |
| Figura 14 Proceso de Modelado de Deposición Fundida (FDM) | 28 |
| Figura 15 Proceso de Deposición de Metal por Láser (LMD) | 30 |
| Figura 16 Piezas de Cerámica | 47 |
| Figura 17 Escultura Producida Mediante Sinterización Selectiva por Láser (SLS) | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 18 Llave Funcional de Poliestireno de Alto Impacto (PAI)..... | 51 |
| Figura 19 Pelota de Juguete de Elastómero Termoplástico (TPE)..... | 52 |
| Figura 20 Soporte para auriculares de poli (ácido láctico) (PLA)..... | 53 |
| Figura 21 Proceso de Extrusión del Filamento..... | 63 |
| Figura 22 Esquema de la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)..... | 63 |
| Figura 23 Máquina Zwick/Roell Modelo Z020 | 64 |
| Figura 24 Máquina Zwick/Roell Modelo Z250 | 66 |
| Figura 25 Punto de Fusión del Poli (Ácido Láctico) (PLA)..... | 68 |
| Figura 26 Temperatura de Transición Vítrea del Poli (Tereftalato de Etileno) (PET) .. | 69 |

Índice de Gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 Principales Materiales Termoplásticos..... | 33 |
| Gráfico 2 Capacidad Calorífica de los Termoplásticos..... | 58 |
| Gráfico 3 Esquema de Reciclaje en Circuito Cerrado de PLA que se Utiliza en la Impresión 3D | 72 |
| Gráfico 4 Módulo de Young de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos | 83 |
| Gráfico 5 Resistencia a la Tracción de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos | 85 |
| Gráfico 6 Elongación a la Rotura de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos | 86 |
| Gráfico 7 Módulo de Flexión de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos..... | 87 |
| Gráfico 8 Resistencia a la Flexión de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos | 88 |

Resumen

El presente Trabajo de Titulación es de carácter científico y bibliográfico; se enmarca en el uso de termoplásticos reciclados para impresión 3D, esto debido a que es una tecnología que ha incrementado notablemente en los últimos años y que a partir de esto se puede fabricar prototipos de forma mucho más rápida. La tecnología de impresión 3D estudiada es la extrusión del material donde utiliza la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF), siendo la más utilizada en los últimos años debido a su Hardware y software libre.

Los termoplásticos empleados en la presente investigación fueron el polietileno de alta densidad (PEAD), el polipropileno (PP) y el poli (tereftalato de etileno) (PET) conjuntamente con un tipo de polímero biodegradable como es el poli (ácido láctico) (PLA), dichos materiales son reciclados obtenidos de un reproceso de extrusión. Se analizó bibliográficamente las propiedades mecánicas y térmicas con la finalidad de recopilar un amplio rango de sus propiedades y poder seleccionar los mejores materiales con buenas características que sean adecuados para la impresión 3D.

Palabras Claves: Impresión 3D, termoplásticos, fabricación por filamento fundido.

Abstract

This Degree Project is scientific and bibliographic in nature; It is part of the use of recycled thermoplastics for 3D printing, due to the fact that it is a technology that has increased notably in recent years and that from this it is possible to manufacture prototypes much faster. The 3D printing technology studied is the extrusion of the material where it uses the fused filament manufacturing technique (FFF), being the most used in recent years due to its hardware and free software.

The thermoplastics used in the present investigation were high-density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) together with a type of biodegradable polymer such as poly (lactic acid) (PLA), said materials are recycled obtained from an extrusion reprocessing. The mechanical and thermal properties were bibliographically analyzed in order to compile a wide range of their properties and to be able to select the best materials with good characteristics that are suitable for 3D printing.

Key Words: 3D printing, thermoplastics, fused filament manufacturing.

Introducción

La idea de la impresión se remonta a la antigua civilización mesopotámica, en los años 3000 a.C., donde se encontraban sellos redondos que se utiliza para imprimir en tabletas de arcilla. Desde entonces, las técnicas de impresión han evolucionado y diversificado, lo que lleva, por ejemplo, a las impresoras portátiles de inyección de tinta que actualmente son dispositivos comunes. Aunque la palabra "impresión" está fuertemente asociada a estas impresoras de inyección de tinta, esto es simplemente una consecuencia de nuestro sentido común, ya que la "impresión" abarca una amplia gama de técnicas que básicamente se desarrollaron para cubrir las necesidades personales o grupales. Con el crecimiento exponencial de la tecnología, progresó y evolucionó las necesidades de la sociedad en donde la impresión 3D se convirtió en una realidad logrando imprimir piezas con formas y dimensiones muy complejas. (Khaliq et al., 2017)

La impresión 3D, ha traído un creciente interés de la industria, así como de la investigación y las comunidades académicas. Recientemente, se han desarrollado técnicas de impresión 3D más económicas y rápidas que pueden producir altas calidades de impresión. Actualmente, se están produciendo materiales poliméricos para impresión 3D con una gama más amplia de propiedades. Estos avances cambian continuamente la forma en que se diseñan, en que se fabrican los productos y cómo los consumidores los utilizan. Las personas innovadoras e inventores ahora pueden producir fácilmente prototipos de sus ideas, ya que la impresión 3D facilita enormemente la producción de los mismos. (Dizon et al., 2018)

La impresión 3D, definida como el proceso que consiste en unir o formar materiales para obtener objetos a partir de datos del modelo 3D generalmente realizado capa por capa, permitiendo fabricar piezas geométricas muy complejas con una mínima necesidad de procesamiento posterior; este proceso genera muy poco desperdicio de

material y a su vez se lo puede aplicar a una variedad de materiales, incluidos polímeros y metales. (Bikas et al., 2015)

Existen varias técnicas diferentes de impresión 3D, pero este Trabajo Fin de Titulación está enfocado en la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF), esta técnica es compatible con una amplia variedad de termoplásticos poliméricos y materiales compuestos; además que se pueden implementar en una amplia gama de escalas de longitud. Sin embargo, la tasa de construcción aplicando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) de escritorio y profesionales es de aproximadamente $10 \text{ cm}^3 / \text{hora}$ a 0.2 mm de espesor de capa, esto determina que los aspectos fundamentales del diseño de la máquina y el mecanismo de impresión 3D limita el rendimiento de la técnica. (Go et al., 2017)

Uno de los materiales comúnmente utilizados en la técnica mencionada anteriormente es el poli (ácido láctico) (PLA), debido a su naturaleza biodegradable, a su economía de costos, aplicabilidad versátil y a su popularidad en las aplicaciones. El PLA es uno de los materiales más utilizados en la técnica FFF. Sin embargo, su susceptibilidad a la temperatura influye en términos de deformación térmica y por lo tanto merece una atención cuidadosa en las aplicaciones. (Lee & Liu, 2019)

El reciclaje de polímeros en el Ecuador en el año 2018 según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), los hogares ecuatorianos clasifican los polímeros en un 37,40 % seguidamente del reciclaje de residuos orgánicos con un 33,20 % y del reciclaje de residuos de papel y cartón con un 32,00 %. (Padilla & Pilataxi, 2019), poniendo de manifiesto la gran cantidad de residuos sólidos plásticos que se generan día a día.

Por lo tanto, en el presente trabajo se estudia la factibilidad del uso del reciclado que existe en el Ecuador como una oportunidad en la impresión 3D, generando un aporte significativo a la sociedad que consta de disminuir los niveles de contaminación y aportar al sector industrial sin la necesidad de importar resinas plásticas desde otros países.

Capítulo I

Marco conceptual

1.1 Impresión 3D

La impresión 3D, es una tecnología que ha tenido un gran desarrollo en los últimos años. Esta forma de fabricación permite elaborar cualquier estructura compleja, lo que ha permitido su presencia en una amplia gama de áreas, como el área aeroespacial, el área médica y la fabricación de motores de vehículos. (Pavlo et al., 2018)

La impresión 3D funciona de una manera completamente diferente: el nombre formal de la impresión 3D en la industria, es fabricación aditiva que es bastante descriptiva del funcionamiento de estas máquinas. Se basa en el principio de fabricación en capas, en el que los materiales se superponen capa por capa, a una velocidad promedio de unos pocos centímetros de altura por hora; esto para dar forma a un sólido que es un objeto tridimensional que toma forma cuando las capas se solidifican. (Durán, 2019)

Esta tecnología se puede utilizar para fabricar rápidamente componentes con cualquier forma compleja mediante la acumulación precisa de material, utilizando modelado sólido de acuerdo con un modelo de diseño asistido por computadora (CAD) o una tomografía computarizada (CT) bajo control de la computadora.(Yan et al., 2018)

La impresión 3D es un proceso de fabricar objetos sólidos tridimensionales a partir de un archivo digital. La creación de un objeto impreso en 3D se logra mediante procesos aditivos. En un proceso de impresión 3D, se crea un objeto imprimiendo capas sucesivas de material hasta que se crea todo el objeto. Cada una de estas capas es una sección transversal horizontal finamente cortada del objeto. Este proceso se llama proceso aditivo, porque utiliza materiales de manera más eficiente que las técnicas de fabricación tradicionales, que son procesos sustractivos (como el corte o la perforación).(Pandian & Belavek, 2017)

La calidad del objeto impreso en 3D depende de la composición del material aditivo, del proceso de fabricación, del tipo de impresoras 3D utilizadas, la velocidad de la impresora y el volumen del objeto impreso.(Pandian & Belavek, 2017)

El objeto creado puede consistir en mecanismos internos (como cojinetes de bolas), formas tejidas y entrelazadas, o incluso hueco y curvado. Por otra parte, la fabricación se refiere al hecho de que las impresoras 3D crean estas capas de acuerdo con algún tipo de proceso sistemático predecible y repetitivo (Ver Figura 1). (Durán, 2019)

Figura 1

Representación Esquemática de la Impresión de un Objeto por Capas



Nota. Adaptado de (Durán Redondo, 2019)

Las impresoras 3D, dado que generalmente se usan en tecnología de alambre fundido, están compuestas de cuatro elementos indispensables: un lecho de impresión, una extrusora (a través de la cual el filamento es lentamente pasado), una cabeza térmica y un filamento de polímero. Las diversas variantes de estos cuatro elementos influyen significativamente en las características técnicas de la máquina. Dependiendo del modelo, la impresora podría ser más rápida, más compacta o incluso más precisa. Estas cuatro piezas se instalan en una estructura sólida y controlada por un sistema de posicionamiento 3D. (Durán, 2019)

1.1.1 Características de impresión 3D

La impresión 3D facilita la contratación externa, así como el intercambio de diseños entre diseñadores y usuarios. Los softwares de programas como Alibre Desing y Autodesk permiten que una persona pueda diseñar un producto en casa o en la oficina, y luego envíe el diseño por correo electrónico a un cliente. Los diseños también se pueden compartir muy fácilmente en la impresión 3D. (Berman, 2012)

➤ **Ventajas de la impresión 3-D en comparación con otras tecnologías**

- Puede construir económicamente productos personalizados en pequeñas cantidades como si se utilizara la producción en masa.

Las fuentes de rentabilidad incluyen:

- No necesita herramientas costosas, moldes o punzones.
- Sin requisitos de fresado o lijado.
- Fabricación automatizada.
- Uso de suministros fácilmente disponibles.
- Capacidad para reciclar material de desecho.
- Capacidad para compartir fácilmente diseños y externalizar la fabricación.
- Velocidad y facilidad de diseño y modificación de productos.(Berman, 2012)

1.1.2 Diseño para la impresión en 3D

Solidworks, AutoCAD, PTC Creo y Rhinoceros (Rhino 3D) son algunos ejemplos de software CAD comercialmente utilizados en el campo de la ingeniería, la arquitectura, el diseño de productos y el diseño industrial. Solidworks es un modelador híbrido de sólidos y superficies, mientras que Rhino 3D utiliza spline B racional no uniforme (NURBS) en el modelado de superficies. Como Rhino 3D facilita el trabajo con superficies complejas en comparación con Solidworks, se usa más ampliamente en el modelado de diseño 3D de productos de moda en los que el diseño involucra muchas superficies curvas.(Yap & Yeong, 2014)

Los procesos de diseño paramétrico, como los algoritmos computacionales, son una nueva herramienta de diseño en la aplicación del producto. En lugar de dibujar o construir un modelo 3D específico en el software CAD usando formas primitivas, las herramientas de modelado algorítmico usan códigos compuestos de variables o relaciones interdependientes. Como los códigos computacionales responden a cambios en variables específicas y entradas físicas, cambiar uno o más de los parámetros genera formas alternativas y, por lo tanto, se logra un diseño individualizado único y una personalización masiva. Las herramientas de diseño paramétrico generativo son extremadamente valiosas para proporcionar una personalización rápida a las personas que no están familiarizadas con el modelado CAD. (Yap & Yeong, 2014)

Estas herramientas también son muy convenientes para el diseño de prendas y joyas impresas en 3D, ya que un código fuente puede generar infinitas formas de diseño basadas en la preferencia del individuo. Al mismo tiempo, las herramientas de diseño son capaces de calcular y verificar la funcionalidad y capacidad de impresión de los formularios, en función de las restricciones y límites establecidos por el diseñador. (Yap & Yeong, 2014)

1.1.3 Velocidad de impresión 3D

La velocidad de impresión es un factor de rendimiento importante en la impresión 3D y un desafío clave que evita que sea un medio práctico de fabricación en algunos casos. Si bien la impresión tridimensional es rápida en comparación con la fabricación estándar, a veces (por ejemplo, en la producción de prótesis), todavía lleva horas e incluso días producir un producto. La velocidad podría mejorarse utilizando componentes de mayor calidad, optimizando los diseños y el movimiento de los láseres. Agregar múltiples cabezales de impresión también puede ayudar a aumentar la velocidad de una impresora 3-D. (Attaran, 2017)

La Robox CEL Impresora de Modelado por Deposición Fundida (FDM) lanzó su primer cabezal de impresión tridimensional de doble material, aunque esta impresora es

más para el aficionado a la impresión tridimensional que para la fabricación comercial. Además, Permite una impresión más rápida para imprimir múltiples materiales al mismo tiempo. Tener cabezales de impresión limitados no es la única barrera para la velocidad de impresión; el tamaño del objeto también puede ralentizar el proceso de impresión 3D. En pocas palabras, los objetos grandes requieren más material, lo que hace que la impresión de objetos más grandes sea un proceso tardío.(Attaran, 2017)

La tecnología para aumentar la velocidad de impresión de objetos grandes se encuentra actualmente en desarrollo. Se están considerando características como boquillas más grandes para una deposición de polímeros más rápida, cortadores láser de alta velocidad con áreas de trabajo más grandes y motores de alta velocidad para acelerar los cabezales de las impresoras. Creando de esta forma innovación tecnológica.(Attaran, 2017)

1.1.4 Métodos de fabricación para impresión 3D

Los métodos se agrupan bajo el termino diseñar para la impresión 3D y que son diseñados para optimizar el rendimiento funcional de la pieza; los métodos de impresión 3D son cinco y serán descritos a continuación:

1.1.4.1 Procesos basados en láser.

La impresión 3D basada en laser es una tecnología dirigida a la preparación de piezas, modificación de superficies y Fabricación de Forma Libre Solida (SFF). En los procesos basados en láser, los aspectos modelados más habituales son la interacción entre el láser y el material y los cambios de fase asociados, ya sea de líquido a sólido (fotopolimerización) o de sólido a líquido (fusión). (Bikas et al., 2015)

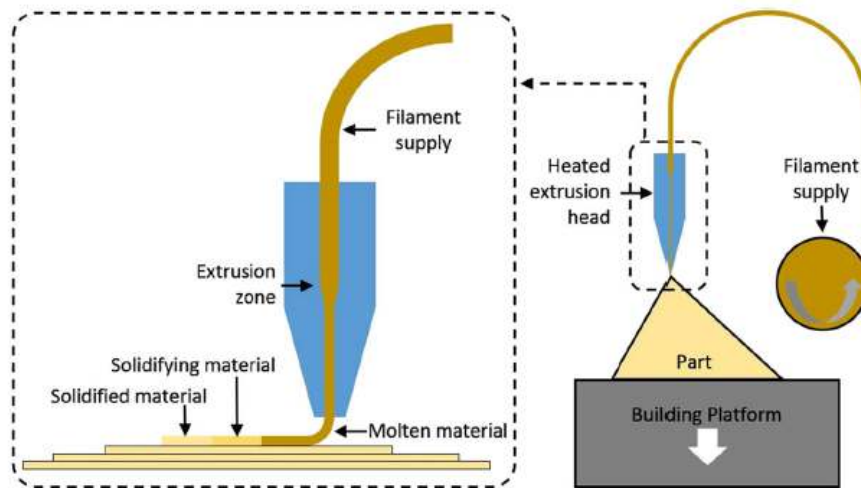
1.1.4.2 Procesos de extrusión.

Los procesos de extrusión de material son térmicos y utilizan una boquilla de extrusión calentada para ablandar o fundir material, generalmente polímero, provisto en forma de alambre. Después de fundirse, el material pasa a través de una boquilla de

extrusión que deposita el material, y luego se enfría para solidificarse y formar la geometría final de la pieza (ver Figura 2). (Bikas et al., 2015)

Figura 2

Proceso de Extrusión, Principio y Esquema



Nota Adaptado de (Bikas et al., 2015)

1.1.4.3 Procesos de inyección.

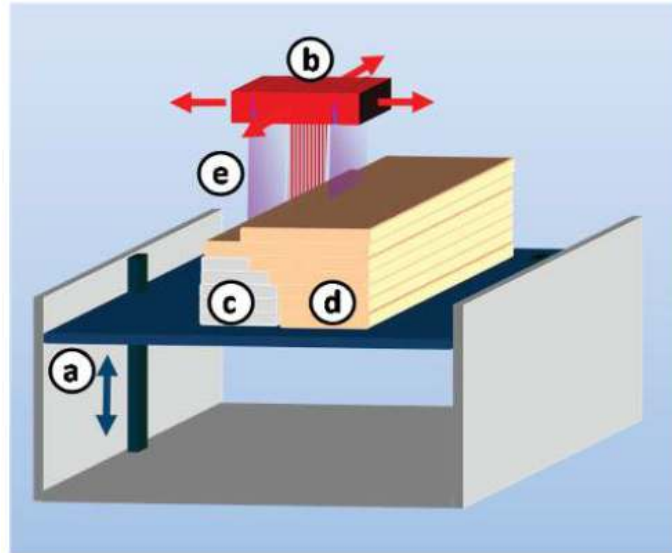
Los procesos de inyección de material utilizan boquillas delgadas para "rociar", de manera controlada, ya sea material fundido o más generalmente un aglutinante (adhesivo) para unir el polvo en un objeto sólido. El principio de funcionamiento del proceso es muy similar a todos los procesos de fusión por láser, aunque no se produce cambio de fase; en cambio, el aglutinante mantiene unidas las partículas de polvo. (Bikas et al., 2015)

Combinando el beneficio de los productores líderes de dispositivos de impresión 3D (Stratasys y 3D Systems; fabricantes estadounidenses de impresoras 3D) han desarrollado impresoras 3D litográficas de inyección de tinta con las ventajas de la inyección de material (alta velocidad y gran volumen de construcción). En la Figura 3 se muestra la configuración básica de dicho sistema. Un cabezal de inyección de tinta con varios cientos de boquillas de barrido a lo largo del eje X, en el proceso expulsa pequeñas gotas de fotopolímero. Después de la deposición de una capa, una lámpara

ultravioleta (UV) cura instantáneamente la ceniza de la capa fresca y el proceso se repite. (Ligon et al., 2017)

Figura 3

Esquema del Proceso de Inyección



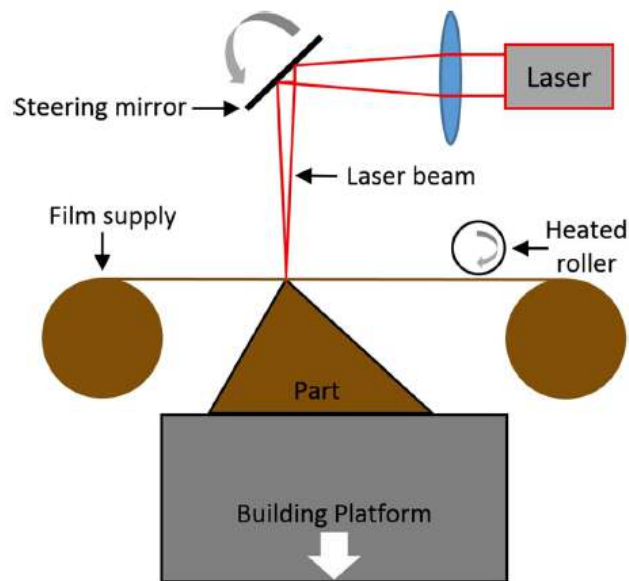
Nota. Consiste en (a) plataforma verticalmente de construcción móvil (b) Cabezal de inyección de tinta multi nozzle (c) capas de material de apoyo (d) capas de material de construcción, y, (e) Fuente de luz ultravioleta (UV) unido a la cabeza de inyección de tinta. Adaptado de (Ligon et al., 2017)

1.1.4.4 Procesos de unión de materiales con adhesivos.

Los procesos basados en adhesivos son de uso limitado hoy en día. El principio de funcionamiento implica un cortador (generalmente un láser), que corta una película delgada de papel o polímero en los contornos deseados. Luego, la película se presiona hacia abajo sobre la anterior mediante un compactador calentado, activando así un adhesivo de curado por calor presente en la cara inferior de la película, para que se adhiera al sustrato (ver Figura 4). (Bikas et al., 2015)

Figura 4

Proceso de Unión de Materiales con Adhesivos



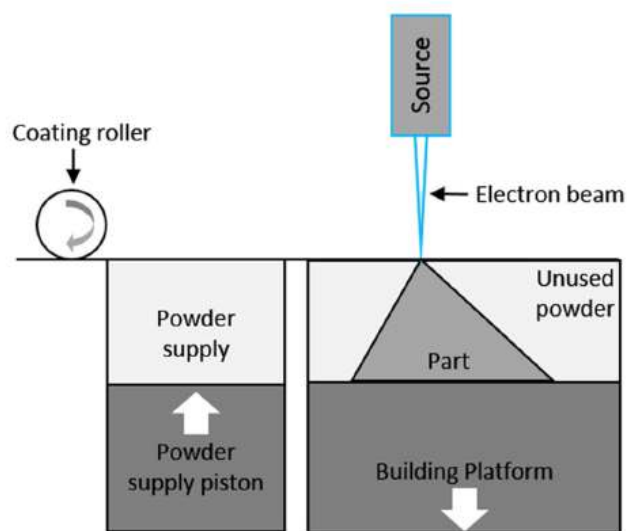
Nota. Adaptado de (Bikas et al., 2015)

1.1.4.5 Proceso de haz de electrones.

Los procesos de haz de electrones son idénticos a los procesos de fusión por láser, pero en lugar de un haz de láser, se utiliza un haz de electrones como fuente de energía para fundir o sinterizar el material (ver Figura 5). (Bikas et al., 2015)

Figura 5

Procesamiento de Haz de Electrones



Nota. Adaptado de (Bikas et al., 2015)

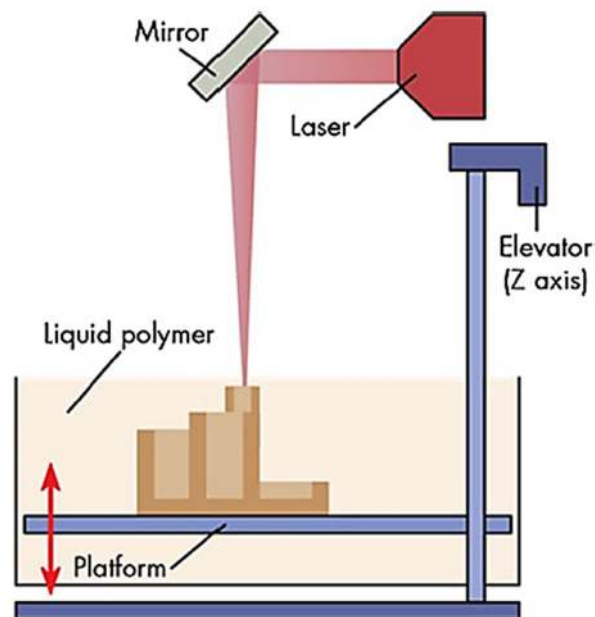
1.1.5 Tipos de tecnologías de impresión 3D

1.1.5.1 Fotopolimerización.

1.1.5.1.1 Sistema de Estereolitografía (SLA).

Esta fue una de las primeras técnicas de la impresión 3D desarrolladas. El concepto básico del Sistema de Estereolitografía (SLA) es imprimir usando una resina fotocurable, típicamente epóxica o acrílica, exponiéndola a la luz ultravioleta (UV) de longitud de onda específica para que las capas de resina expuestas con patrones 2D se solidifiquen a través de un proceso llamado fotopolimerización (ver Figura 6), una plataforma se sumerge en un depósito de polímero líquido a una profundidad de 0.05 – 0.15 mm antes de imprimir. Esto define la altura real de la capa o la profundidad de cada corte del objeto 3D completo en un archivo STL (formato de archivo informático de diseño asistido por computadora que define la geometría de objetos 3D). (Dizon et al., 2018)

El láser de luz ultravioleta (UV) se refleja a la superficie del polímero líquido a través de un espejo y recorre todo el camino del patrón de la sección transversal. Luego, la plataforma se mueve hacia abajo a una profundidad inicialmente definida, y luego se repite el ciclo de impresión, construyendo capa por capa hasta que el objeto esté completamente formado. La mezcla de resina se puede combinar con componentes fotoiniciadores y absorbentes de luz ultravioleta (UV) para ajustar la profundidad de la polimerización. (Dizon et al., 2018)

Figura 6*Sistema de Estereolitografía*

Nota. Adaptado de (Dizon et al., 2018)

Este es uno de los determinantes de la calidad del producto terminado junto con la potencia del láser, la velocidad de escaneo y el tiempo de exposición a los rayos UV; una de las principales ventajas del Sistema de Estereolitografía (SLA) sobre las técnicas de impresión 3D existentes es su impresión de alta resolución, que está determinada por la cantidad de fotones aplicados. Por lo general, se emite un fotón para desencadenar la polimerización. Es posible lograr una resolución superior a 100 micras como efecto del inicio de la polimerización localizada. (Dizon et al., 2018)

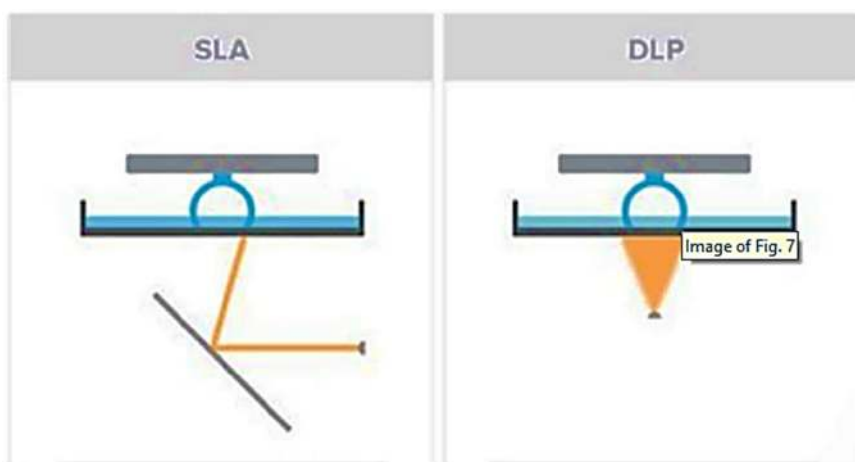
La impresora 3D Formlabs Form2 para el Sistema de Estereolitografía (SLA) en realidad tiene un espesor de capa de 25 micras (es decir, resolución). Con una impresión de tan alta resolución se pueden crear objetos sofisticados a partir de una impresora 3D. Dado que el mecanismo del Sistema de Estereolitografía (SLA) no utiliza ninguna boquilla, la obstrucción no es un problema. Sin embargo, la configuración de un sistema de impresión 3D basado en SLA ha obstaculizado las principales industrias de fabricación debido al alto costo. (Dizon et al., 2018)

1.1.5.1.2 Procesamiento Digital por Luz (DLP).

El Procesamiento Digital por Luz (DLP) es otra técnica de polimerización bastante similar al Sistema de Estereolitografía (SLA), excepto que, en lugar de usar rayo láser de escaneo para solidificar una capa de resina, se proyecta una máscara digital para crear el modelo (ver Figura 7). La resolución del Sistema de Estereolitografía (SLA) puede ser definido por el tamaño del punto creado por el láser. (Dizon et al., 2018)

Figura 7

Exposición Selectiva a la Luz por un Láser vs un Sistema de Estereolitografía



Nota. Adaptado de (Dizon et al., 2018)

El Procesamiento Digital por Luz (DLP) usa una imagen digital proyectada, donde el tamaño de píxel caracteriza su resolución. Técnicamente, el Procesamiento Digital por Luz (DLP) puede imprimir un objeto con menos tiempo en comparación con el Sistema de Estereolitografía (SLA), ya que cada capa está expuesta completamente por un patrón proyectado en lugar de escanearse meticulosamente por un láser. Esto es ventajoso cuando se imprimen simultáneamente varios objetos de gran tamaño compactados con menos detalles. Sin embargo, cuando se imprimen objetos con detalles más pequeños, una lente de proyección que enfoca la luz en cierta área de la plataforma de construcción es necesaria para retener la resolución de impresión. Por otro lado, el Sistema de Estereolitografía (SLA) generalmente puede lograr una

resolución más alta y un mejor acabado de superficie que el procesamiento digital por luz (DPL). (Dizon et al., 2018)

1.1.5.1.3 Interfaz de Producción Líquida Continua (CLIP).

Un objeto macroscópico de varios centímetros de altura puede tomar horas para construirse. Para que la impresión 3D sea viable en la producción en masa, las velocidades de impresión deben aumentar al menos un orden de magnitud manteniendo una excelente precisión de la pieza. A pesar de que la inhibición de oxígeno de la polimerización por radicales libres es un obstáculo ampliamente encontrado para fotopolimerización ultravioleta (UV), y que controlando la inhibición de oxígeno se puede permitir una Estereolitografía más simple y rápida. (Tumbleston et al., 2015)

Por lo general, la inhibición de oxígeno conduce a una cura incompleta y pegajosidad superficial cuando la fotopolimerización se realiza en aire. El oxígeno puede apagar el fotoiniciador fotoexcitado o crear peróxidos combinados con el libre radical del fotoiniciador fotoclavado. Si se pueden evitar estas vías de inhibición de oxígeno, la eficiencia resultará en la iniciación y propagación de cadenas poliméricas. Cuando la Estereolitografía se realiza por encima de un oxígeno permeable, ventana de compilación; la Interfaz de Producción Líquida Continua (CLIP) se habilita creando una "zona muerta" que contiene oxígeno, una capa delgada de líquido sin curar entre la ventana y la superficie de la pieza curada. Los grosores de la zona muerta son del orden de decenas de micrómetros y se mantienen mediante una selección juiciosa de los parámetros de control. (Tumbleston et al., 2015)

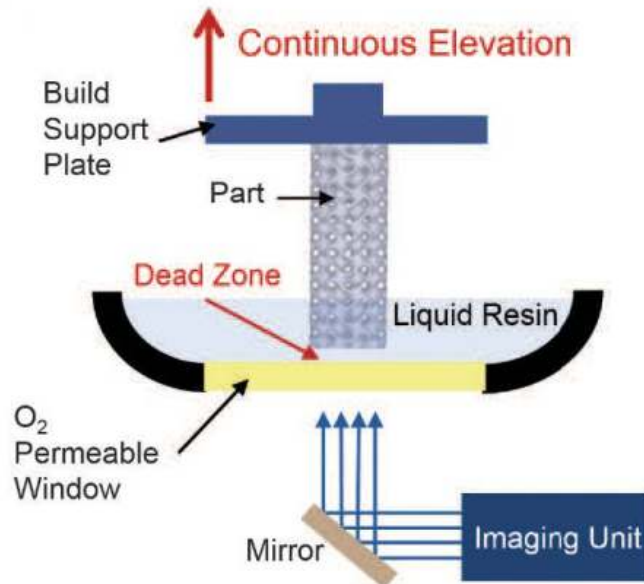
Las relaciones simples describen el espesor de la zona muerta y el proceso de curado de la resina y, a su vez, dan como resultado una relación directa entre la velocidad de impresión y la resolución de la pieza. La Interfaz de Producción Líquida Continua (CLIP) se puede aplicar a una gama de tamaños de piezas con diámetros de 50µm a objetos de mano complejos de más de 25 cm de tamaño. (Tumbleston et al., 2015)

En la Figura 8 ilustra la simple arquitectura y operación de una impresora 3D que aprovecha de un oxígeno inhibido en la zona muerta. La Interfaz de Producción Líquida Continua (CLIP) procede proyectando una secuencia continua de imágenes ultravioletas (UV) (generadas por una unidad de procesamiento de luz digital) a través de una ventana permeable transparente a los rayos Ultravioleta (UV) debajo de una bañera con resina líquida; La zona muerta creada debe estar por encima de la ventana manteniendo un interfaz, la parte de curado se extrae continuamente de la resina de baño, creando fuerzas de succión que renuevan constantemente la resina líquida reactiva. (Tumbleston et al., 2015)

Este proceso continuo es fundamentalmente diferente de la Estereolitografía tradicional ascendente en las impresoras, donde la exposición a los rayos ultravioleta (UV), la renovación de la resina, y parte el movimiento debe realizarse en pasos separados y discretos. Incluso para enfoques invertidos de arriba hacia abajo en los que la fotopolimerización ocurre en una interfaz aire-resina (es decir, la parte se baja sucesivamente a un baño de resina durante la impresión), estos pasos deben realizarse secuencialmente para la formación de cada capa. Porque cada paso toma varios segundos para implementar para cada capa, y porque cada capa de una parte tiene un espesor típico de 50 a 100 μ m, las velocidades de impresión vertical están restringidas a unos pocos milímetros por hora. Por el contrario, la velocidad de impresión para Interfaz de Producción Líquida Continua (CLIP) está limitada por tasas de curado de resina y viscosidad, no por formación de capas por etapas. (Tumbleston et al., 2015)

Figura 8

Proceso de Interfaz de Producción Líquida Continua



Nota. Adaptado de (Tumbleston et al., 2015)

1.1.5.2 Fusión de Lecho de Polvo (PBF).

1.1.5.2.1 Sinterización Selectiva por Láser (SLS).

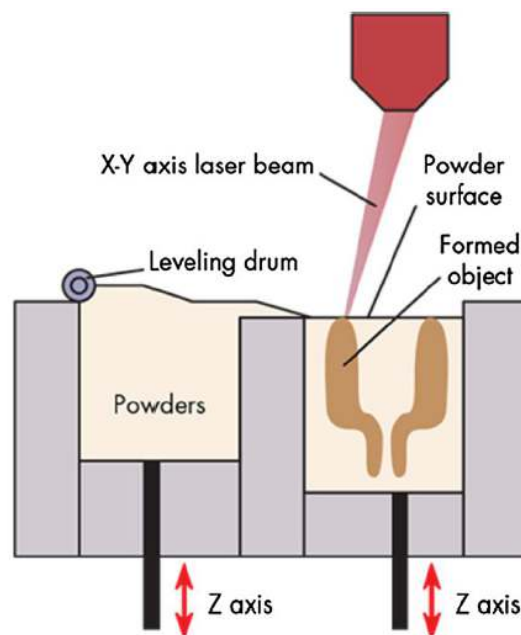
La Sinterización Selectiva por Láser (SLS) es un tipo de Fusión de Lecho de Polvo (PBF) en donde un lecho de polímero en polvo, resina o metal está dirigido parcialmente (sinterización) o completamente (fusión) por una fuente de calentamiento direccional de alta potencia como el láser que da como resultado una capa solidificada de polvo fundido. (Dizon et al., 2018)

En la Figura. 9, una configuración de Sinterización Selectiva por Láser (SLS) generalmente se compone de la cámara de reserva de polvo y la cámara de impresión. Ambas cámaras se calientan inicialmente a cierta temperatura justo por debajo del punto de fusión del material. Se emite un rayo láser de eje X-Y de alta potencia sobre la superficie de polvo precalentado de la cámara de impresión que luego sinteriza un patrón bidimensional. La cámara de impresión se mueve hacia abajo a una profundidad predefinida (altura de capa) mientras la cámara de reserva se mueve hacia arriba, exponiendo parte del polvo en el nivel de impresión. El tambor de nivelación hace rodar

los polvos expuestos desde la parte superior de la cámara de reserva hasta el vacío de la parte superior de la cámara de impresión, aplicando otra capa de polvo fresco sobre la superficie de impresión. Este proceso se repite hasta que se haya impreso la última capa. Después de imprimir, la cámara de impresión que contiene el objeto solidificado rodeado de polvo, debe sacudirse para revelar el elemento impreso. (Dizon et al., 2018)

Figura 9

Configuración de Impresión 3D para Sinterización Selectiva por Láser



Nota. Adaptado de (Dizon et al., 2018)

Los factores que definen la calidad de una impresión de Sinterización Selectiva por Láser (SLS) son: el tamaño de partícula del polvo, la potencia del láser, el espacio de escaneo y la velocidad de escaneo. Las capas sobresalientes en el diseño de un objeto son un desafío tanto para el Sistema de Estereolitografía (SLA) como para la impresión 3D porque requiere el uso de estructuras de soporte. (Dizon et al., 2018)

La Sinterización Selectiva por Láser, por otro lado, no necesita soporte estructural ya que el polvo actúa como soporte para el artículo impreso; permitiendo que los objetos complicados se impriman con facilidad. El mecanismo de Sinterización Selectiva por Láser (SLS) permite que solo se impriman polímeros termoplásticos tales como la policaprolactona (PCL) y poli (ácido láctico) (PLA), cerámica y metales; teniendo

en cuenta el complejo comportamiento de consolidación y el proceso de difusión molecular. (Dizon et al., 2018)

La suavidad de la superficie de una impresión realizada por un Sistema de Estereolitografía (SLA) es mejor que la Sinterización Selectiva por Láser (SLS). Además, configurar una máquina SLS requiere un alto costo debido al uso de costosas fuentes de calentamiento de alta potencia como láser o haz de electrones para materiales con alta temperatura de fusión. (Dizon et al., 2018)

1.1.5.2.2 Multi-Jet Fusión (MJF).

La tecnología Multi-Jet Fusión, fue diseñada para abarcar el nicho de mercado, tanto para la creación de prototipos funcionales como para la fabricación de piezas finales en el campo industrial. La tecnología multi-Jet fusión (MJF) es capaz de lograr resultados similares a los procesos de transformación polimérica. El moldeo por inyección de polímero es considerado una tecnología de Sinterización de Alta Velocidad (HSS), ya que implica la sinterización de perfiles 2D de capas de polvo, similar a la tecnología Binder Jetting (BJ), sin la necesidad de un láser. (Morales et al., 2018)

En la tecnología Multi-Jet Fusión (MJF), el cabezal de impresión imprime agentes funcionales en ubicaciones precisas sobre el material para definir la geometría de la parte y sus propiedades. Es capaz de imprimir treinta millones de gotas por segundo en todo el ancho del espacio de impresión. Esto conduce a una precisión dimensional muy precisa ($\pm 0.2\%$) en comparación con otras tecnologías debido a la velocidad de impresión, la precisión dimensional y la alta calidad de las piezas impresas. Esta tecnología se convierte en un interesante sistema de fabricación de soluciones de impresión 3D. La tecnología Multi-Jet Fusión (MJF) se puede utilizar para fabricar tanto prototipos funcionales y series de lotes pequeños cargados con presión de agua interior. (Morales et al., 2018)

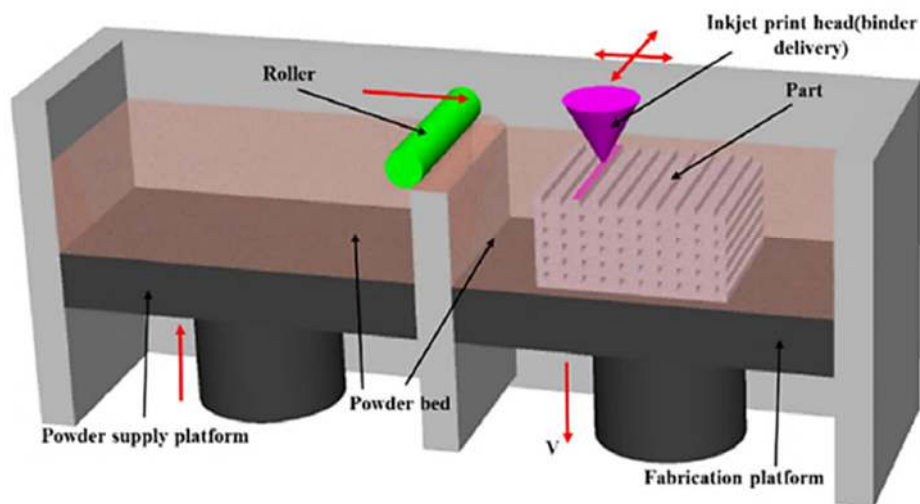
1.1.5.3 Inyección de aglutinante (Binder Jetting).

1.1.5.3.1 Impresión Tridimensional (3DP).

La Impresión Tridimensional (3DP) es otro tipo de tecnología de impresión 3D desarrollada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Esta tecnología se basa en el procesamiento de polvo (ver Figura 10), donde los polvos primero se extiende sobre la plataforma de construcción y luego se unen selectivamente en una capa estampada depositando un aglutinante líquido a través del cabezal de impresión de inyección de tinta que puede moverse en los ejes de x-y. Después de que se forma un patrón 2D deseado, la plataforma baja y se extiende la siguiente capa de polvo. Este proceso se repite y el polvo finalmente no unido debe eliminarse para obtener productos finales. (Wang et al., 2017)

Figura 10

Proceso de Impresión Tridimensional



Nota. Adaptado de (Wang et al., 2017)

La calidad del producto final depende del tamaño de la partícula de polvo, la viscosidad del aglutinante, la interacción aglutinante-polvo y la velocidad de la deposición del aglutinante. Si bien esta tecnología sufre de mala calidad de superficie, volumen de construcción limitado y porosidad del producto final, las ventajas de esta

técnica son su configuración de bajo costo, capacidad de múltiples materiales y entorno de procesamiento ambiental. (Dizon et al., 2018)

Las principales ventajas de esta tecnología son la flexibilidad de selección de materiales y procesamiento a temperatura ambiente. Teóricamente, cualquier material polimérico en estado de polvo podría ser impreso por esta tecnología. La eliminación de la estructura de soporte es relativamente fácil con esta técnica. Sin embargo, el aglutinante utilizado puede incorporar otras contaminaciones y la resolución de impresión es muy limitado para esta tecnología. (Wang et al., 2017)

1.1.5.4 Inyección de Material (Material Jetting).

1.1.5.4.1 PolyJet.

Polyjet se considera una técnica de inyección de tinta avanzada en la que, en lugar de usar tinta, múltiples boquillas de impresión rocían con precisión gotas de estaño de fotopolímero líquido u otros materiales líquidos, de ahí el nombre de PolyJet. (Dizon et al., 2018)

Una luz ultravioleta cura instantáneamente las gotitas creando capas ultradelgadas en la plataforma de construcción para formar el objeto 3D. Las impresiones complejas requieren soporte, que debe eliminarse manualmente. El curado posterior del producto final es innecesario. Sus ventajas incluyen alta resolución e impresión simultánea de múltiples materiales. También puede incorporar una selección de colores para producir productos finales multicolores. (Dizon et al., 2018)

1.1.5.4.2 Modelado de Chorro Múltiple (MJM).

El principio subyacente del Modelado de Chorro Múltiple (MJM) es la estratificación, utilizado en la mayoría de los otros sistemas de Prototipado Rápido (RP). Con la técnica del Modelado de Chorro Múltiple (MJM) se construye modelos usando una técnica similar a la impresión por inyección de tinta aplicada en tres dimensiones. La cabeza de la impresora (MJM) se mueve en el plano x-y, depositando material termoplástico solo donde sea necesario, construyendo una solo capa del modelo. Una

lámpara ultravioleta (UV) parpadea a través de cada pasada para curar el termoplástico depositado. Cuando la capa está completa, la plataforma está distanciada de la cabeza (eje z) y el cabezal comienza a construir la siguiente capa. (Bikas et al., 2015)

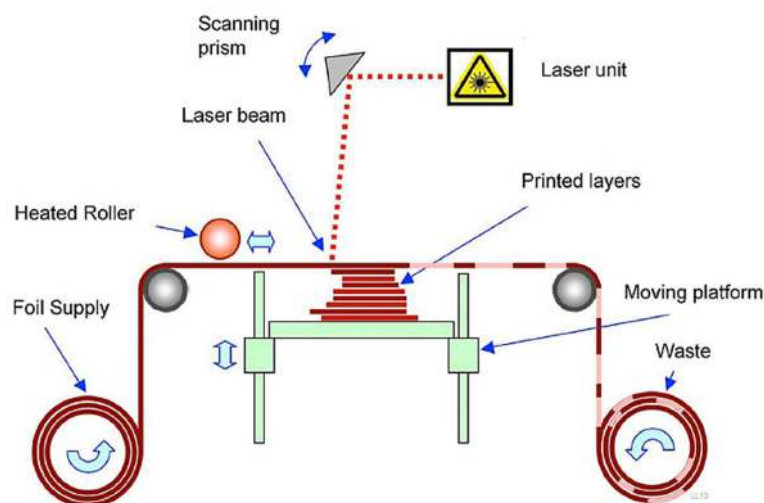
1.1.5.5 Laminación de hojas.

1.1.5.5.1 Fabricación de Objetos Laminados (LOM).

La Fabricación de Objetos Laminados (LOM) se utiliza ampliamente en la industria como una técnica rápida de creación de prototipos e impresión 3D (ver Figura 11), el ciclo de impresión generalmente consiste en extender un material de lámina activado por calor, que luego se lamina sobre un sustrato a través del rodillo; la capa se forma cortando con el láser el patrón y trama en cruz el área no parcial que se va a depositar en el rodillo de residuos. La plataforma se mueve hacia abajo para prepararse para la siguiente capa. El proceso se repite hasta que se forma el objeto. (Dizon et al., 2018)

Figura 11

Esquema de la Fabricación de Objetos Laminados



Nota. Adaptado de (Dizon et al., 2018)

Los diseños no son un problema ya que el producto elaborado en la Fabricación de Objetos Laminados (LOM) es autosuficiente. Sin embargo, lleva mucho tiempo separar el material no deseado de los objetos impresos complejos porque el área que

no es parte tiene un gran rayado por láser, aunque su propósito es facilitar la extracción. Se sabe que la Fabricación de Objetos Laminados (LOM) tiene un bajo nivel de acabado y de resolución especialmente la precisión del eje z, que depende del grosor de la lámina utilizada y de la presión de adhesión. (Dizon et al., 2018)

1.1.5.5.2 Fabricación Aditiva Ultrasónica (UAM).

La Fabricación aditiva ultrasónica (UAM) es un proceso de soldadura de estado sólido que utiliza energía ultrasónica para construir componentes tridimensionales complejos de lámina metálica. La cinta metálica delgada se une inicialmente por ultrasonidos a un material de sustrato con cintas adicionales posteriormente unido a la capa anterior. El método continúa hasta que se logra la geometría deseada. Se incorporan operaciones de fresado controladas por computadora in situ para crear intrincados canales internos de enfriamiento y para mantener geometrías complejas de las piezas. Este proceso de fabricación único conlleva dos ventajas específicas: (1) reducción de costos en comparación con lo convencional (fundición, forja y mecanizado), procesamiento para producir piezas de prototipo y (2) la capacidad de fabricar geometrías que no son posibles a través de operaciones de fresado convencionales. (Dehoff & Babu, 2010)

El proceso de Fabricación Adhesiva Ultrasónica (UAM) tiene la capacidad de incorporar materiales de segunda fase, como fibras ópticas, aleaciones con memoria de forma para dispositivos de detección y fibras de refuerzo, o mallas para crear materiales compuestos con propiedades específicas. La fabricación de aditivos ultrasónicos también ha demostrado la capacidad de unir materiales diferentes que son difíciles o imposibles de unir mediante soldadura convencional. (Dehoff & Babu, 2010)

1.1.5.6 Extrusión de Material.

1.1.5.6.1 Fabricación por Filamento Fundido (FFF).

La impresión 3D avanza rápidamente hacia nuevos materiales y aplicaciones, es vital comprender los límites de rendimiento de las tecnologías de proceso de impresión

3D y superar estos límites mediante el diseño mejorado de la máquina y la integración de procesos. Esta técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) es compatible con una amplia variedad de termoplásticos poliméricos y materiales compuestos; además que se pueden implementar en una amplia gama de escalas de longitud. Sin embargo, la tasa de construcción aplicando la técnica FFF de escritorio y profesionales es de aproximadamente 10 cm³ / hora a 0.2 mm de espesor de capa, esto determina que los aspectos fundamentales del diseño de la máquina y el mecanismo de impresión 3D limita el rendimiento de la técnica. (Go et al., 2017)

El módulo de alimentación de filamento es responsable de suministrar filamento termoplástico y de aplicar fuerza al filamento de manera que pueda empujarse suavemente a través del calentador y la boquilla. En los sistemas de impresión 3D, esto se logra utilizando un mecanismo de rodillo de presión que comprende un accionamiento, rueda de presión y brazo de resorte (ver Figura 12). (Go et al., 2017)

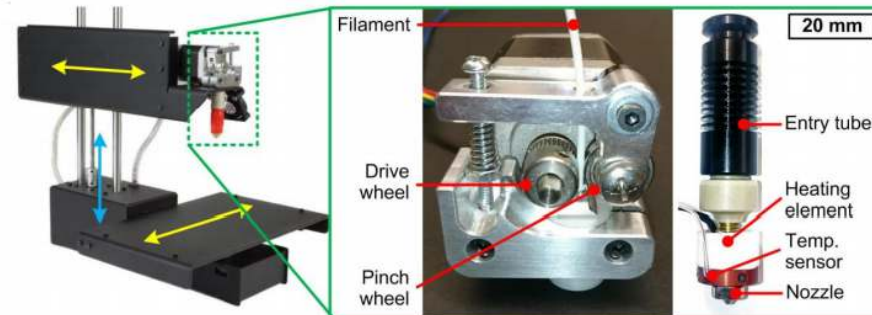
El filamento, típicamente de 1.75 mm o 2.85 mm diámetro, se alimenta tangencialmente a la superficie de la rueda motriz. El rodillo de presión unido al resorte. El brazo proporciona una fuerza normal contra el filamento para mantener la tracción con la rueda motriz que el filamento avanza idealmente sin deslizamiento. Típicamente, la tracción debe ser perfecta entre el filamento y el rodillo impulsor; como resultado, el criterio de falla se establece por la tasa a la que la caída de presión requerida por la boquilla excede el máximo torque del motor, o por la fuerza a la que se produce el pandeo de la longitud no soportada del filamento. El fracaso también puede ser causado por la pérdida de tracción entre la rueda motriz y el filamento. (Go et al., 2017)

En la actualidad la rueda motriz es de metal y típicamente estriada; esto crea pequeñas muescas en el filamento a medida que pasa y, por lo tanto, puede producirse un fallo debido al corte en lugar de al deslizamiento. La unidad de alimentación de filamentos generalmente se monta directamente en el pórtico, pero algunos sistemas utilizan mecanismo de estilo Bowden donde el mecanismo de alimentación está unido

al bastidor de la máquina estacionaria y el filamento es guiado por la boquilla a través de un tubo flexible. (Go et al., 2017)

Figura 12

Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)



Nota. Adaptado de (Go et al., 2017)

1.1.5.6.2 Modelado por Deposición Fundida (FDM).

Scott Crump, el cofundador de Stratasys, patentó el Modelado por Deposición Fundida (FDM) en 1989. Las impresoras 3D basadas en FDM son actualmente las más populares impresoras 3D a nivel del consumidor para imprimir polímeros compuestos que se basan en la impresión 3D por el sistema extrusión. El Modelo de Deposición Fundida (FDM) es una de las siete técnicas desarrolladas en la tecnología de impresión 3D. Esta técnica utiliza el proceso de extrusión, donde un filamento termoplástico se funde y se deposita para generar el producto. (Dizon et al., 2018)

La simplicidad del proceso en el Modelado de Deposición Fundida (FDM) hace que su equipo sea relativamente económico. Además, las materias primas utilizadas son de bajo costo, no tóxicas e inodoras, lo que las hace ideales para los aficionados. Los materiales más utilizados en FDM son: Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), poli(ácido láctico) (PLA) y policarbonato (PC). (Pavlo et al., 2018)

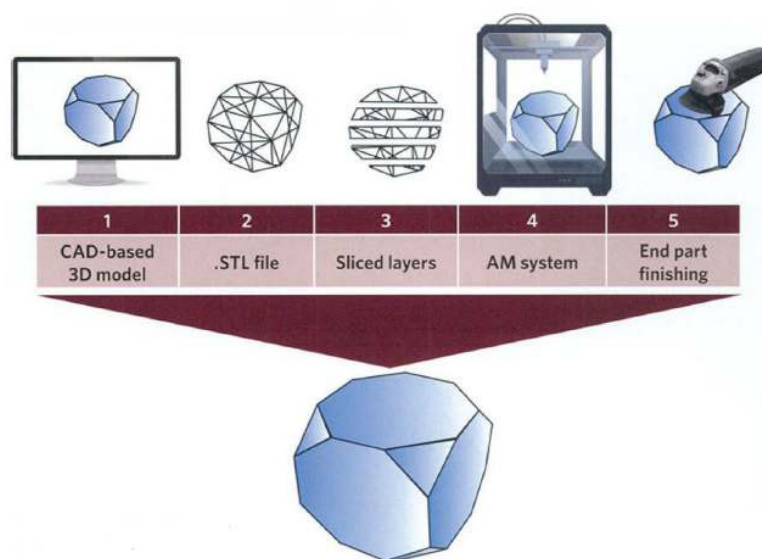
La impresión 3D basada en extrusión generalmente reduce el principio de impresión de extruir un material y depositarlo en una plataforma creando una capa bidimensional encima de otra que da como resultado un objeto tridimensional tangible. Entre otras técnicas basadas en extrusión, la impresión 3D es una técnica de fusión de

materiales que utiliza un carrete de filamento termoplástico como policarbonato (PC), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y poli (ácido láctico) (PLA) con diferentes diámetros para fundirse y extruirse a través de una boquilla calentada. (Dizon et al., 2018)

Recientemente, los termoplásticos con temperaturas de fusión más altas, como la polietereetercetona (PEEK), ya se pueden usar como materiales para la impresión 3D de escritorio. En la Figura 13 el polímero semilíquido extruido que realmente se imprime en la plataforma de construcción se solidifica instantáneamente, traduciendo las capas cortadas de datos digitales en un objeto impreso real. Dado este mecanismo único de impresión 3D, el uso de polímeros termoplásticos y su proceso específico de fundición de materiales son sus principales limitaciones. (Dizon et al., 2018)

Figura 13

Flujo de Proceso de Impresión 3D



Nota. Adaptado de (Dizon et al., 2018)

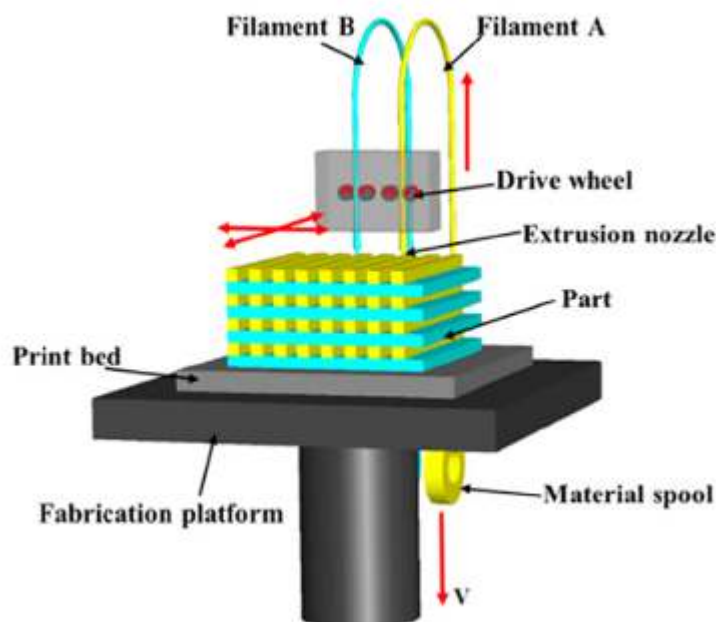
Principalmente, el filamento en sí debe fabricarse con una alta calidad porque la acción de alimentación (tensión y compresión) y fusión (calentamiento) de la impresión 3D probará su estabilidad mecánica y térmica. El filamento debe soportar estas tensiones, antes y después de la fusión, para poder mantener una buena calidad de impresión. Algunos diseños digitales en 3D son relativamente complejos (con capas

sobresalientes) para imprimirlos usando la impresión 3D y se requiere utilizar estructuras de soporte. Por otro lado, la impresión 3D usando la técnica de Modelado por Deposición Fundida (FDM) es conocida por ser de bajo costo y realizarse a altas velocidades de impresión en comparación con otras técnicas de impresión 3D. (Dizon et al., 2018)

También se debe mencionar que las impresoras de Modelado por Deposición Fundida (FDM) funcionan de forma controlada en la extrusión de filamentos termoplásticos (ver Figura 14). En la técnica de Modelado por Deposición Fundida (FDM), los filamentos se funden en un estado semilíquido en la boquilla y se extruyen capa por capa en la plataforma de construcción donde las capas se fusionan juntas para luego solidificarse. La calidad de la impresión de las piezas puede controlarse alterando los parámetros de impresión, como espesor de capa, orientación de impresión, ancho de trama y ángulo de trama. (Wang et al., 2017)

Figura 14

Proceso de Modelado de Deposición Fundida (FDM)



Nota. Adaptado de (Wang et al., 2017)

1.1.5.7 Deposición Directa de Energía (DED)

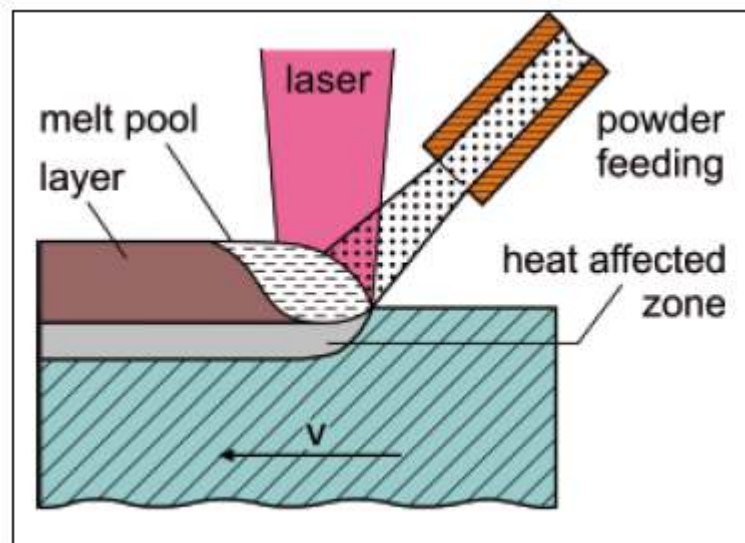
1.1.5.7.1 Deposición de Metal por Láser (LMD)

El proceso de Deposición de Metal por Láser (LMD) para la impresión 3D utiliza materiales en polvo sin aditivos ni aglutinantes. La característica común de todos los procesos de impresión 3D es la provisión de datos geométricos para la fabricación de las partes. por lo tanto, el punto de partida es un modelo CAD tridimensional, que se subdivide en capas de un grosor definido. La parte real se fabrica mediante un proceso repetitivo de aplicación de nuevas capas de material y transferencia de la información geométrica de cada capa al material utilizando un rayo láser. (Gasser et al., 2010)

La diferencia más importante entre la Deposición de Metal por Láser (LMD) y la Fusión Selectiva por Láser (SLM) es la provisión del material en polvo para LMD, el material en polvo se suministra localmente mediante una boquilla de alimentación de polvo (coaxial o no axial), mientras que para SLM la pieza se fabrica en un "lecho de polvo", en ambos se procesa el polvo completamente derretido, lo que resulta en capas completamente densas sin procesamiento posterior. Esto permite propiedades mecánicas que son iguales o incluso mejor para los de chapa laminada. La precisión y la libertad geométrica de la técnica de Fusión Selectiva por Láser (SLM) es mayor en comparación con la Deposición de Metal por Láser (LMD), mientras que la posibilidad de acumular capas de material directamente en superficies 3D y la procesabilidad de piezas muy grandes son las principales ventajas de Deposición de Metal por Láser (LMD) (ver Figura 15). (Gasser et al., 2010)

Figura 15

Proceso de Deposición de Metal por Láser (LMD)



Nota. Adaptado de (Gasser et al., 2010)

El proceso por Deposición de Metal por Láser (LMD) muestra las siguientes ventajas: No requiere herramientas ni moldes, haciendo ellos los procesos de elección para la fabricación rápida de componentes individuales personalizados y de volumen bajo a medio. (Gasser et al., 2010)

- ❖ Comprende procesos altamente flexibles.
- ❖ Hace un uso eficiente del material (valioso) y recursos, creando componentes de alto valor de manera rentable.
- ❖ Puede producir pequeñas características geométricas, actualmente 100 – 200 μ m. (Gasser et al., 2010)

1.1.5.7.2 Deposición Directa de Metal (DMD).

El proceso de Deposición Directa de Metal (DMD) es una técnica de fabricación aditiva que utiliza un láser como fuente de energía para sinterizar o fundir material en polvo (típicamente metal), con el láser apuntando automáticamente a puntos en el espacio, definidos por un modelo 3D, uniendo el material para crear una estructura sólida. (Bikas et al., 2015)

El principio de funcionamiento está muy cerca del proceso de Sinterización Selectiva por Láser (SLS), aunque carece de un lecho de polvo; en cambio, el polvo es alimentado por una serie de boquillas (generalmente 3) directamente al cabezal de procesamiento, similar al del Modelado de Ingeniería Láser (LENS). (Bikas et al., 2015)

1.1.5.7.3 Modelado de Ingeniería Láser (LENS).

El modelado utiliza un láser de alta potencia para fundir polvo de metal. En especial la boquilla de suministro de polvo diseñada, inyecta el polvo y transmite directamente del rayo láser enfocado al cabezal láser; mientras que la boquilla de polvo se mueve como una unidad integral. Los polvos de metal se entregan y distribuyen alrededor de la circunferencia de la cabeza ya sea por gravedad o usando un gas portador presurizado. (Bikas et al., 2015)

El rayo láser crea una pequeña piscina fundida en el sustrato; el polvo que alimenta a esta región es consumido en esta piscina, haciendo que su altura crezca lejos de la superficie del sustrato. Los ejes x-y se mueven para fabricar cada capa del objeto. La cabeza se mueve verticalmente a medida que se completa cada capa. Esta técnica es equivalente a varias técnicas de marca registrada, como Deposición Directa de Metal (DMD) y Metalurgia de Polvo en Capas (LPD). En comparación con los procesos que usan lechos de polvo, como la Sinterización Selectiva por Láser (SLM), Los objetos creados con esta tecnología pueden ser sustancialmente más grandes, incluso hasta varios metros de largo; sin embargo, la precisión y la calidad de la superficie suele ser menor. (Bikas et al., 2015)

1.2 Tipos de materiales actualmente utilizados en impresoras 3D.

Los materiales para los sistemas de impresión 3D se definen por la tecnología de procesamiento para su fabricación. Cada tecnología de impresión 3D transforma el material a través de calor externo, luz láser y otras energías dirigidas. La capacidad de la composición mecánica de un material para reaccionar positivamente a una determinada energía dirigida combina ese material con una tecnología que puede

proporcionar el cambio deseado. Estas asociaciones de tecnología de materiales se expandirán a medida que los materiales avancen y se explore la química del material. (Pandian & Belavek, 2017)

Los materiales de impresión 3D están disponibles en diferentes tipos y estados de materiales, como polvo, filamentos, gránulos, resina, etc. Los tipos de materiales específicos y las propiedades de los materiales se desarrollan con mayor precisión para adaptarse a la aplicación. Ya hay muchos materiales disponibles. Se están desarrollando nuevos materiales a medida que surgen nuevas aplicaciones para la impresión 3D. (Pandian & Belavek, 2017)

1.2.1 Polímeros

Los polímeros por sus cualidades permiten adquirir diversas formas, usos y presentaciones variadas. Debido a su bajo costo y a sus cualidades (ligereza, rigidez y resistencia), ha reemplazado en gran parte a los materiales tradicionales. Existen alrededor de cincuenta familias diferentes de polímeros y centenares de variedades distintas. (Virginie, 2011)

Los materiales poliméricos además de tener características de versatilidad en aplicación, bajo peso, fáciles de procesar y tener rapidez de producción, la mayor ventaja que presentan, es que consumen menor energía para su obtención y transformación que los metales o el vidrio. (Madrigal, 2011)

Según su plasticidad los plásticos se clasifican en tres categorías muy diferentes que son termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Termoplásticos: Los polímeros termoplásticos se reblandecen al aplicarles calor, es por ello que pueden moldearse por diferentes procesos como el de inyección que es tal vez el más importante. Sin embargo, si se excede la temperatura se degradan. (Madrigal, 2011)

Los termoplásticos son materiales que a temperatura ambiente presentan un estado rígido; se deforman al calentarse (pueden fundirse) y se endurecen al enfriarse.

Para que un polímero se considere termoplástico su temperatura de transición vítrea T_g (para materiales amorfos) o su temperatura de fusión T_m (caso de materiales cristalinos) debe ser superior a la temperatura ambiente. (Camuña, 2013) En el Gráfico 1 pueden observarse algunos ejemplos de materiales termoplásticos.

Gráfico 1

Principales Materiales Termoplásticos

| Principales materiales termoplásticos | | |
|---------------------------------------|----------|---|
| Polímero | Acrónimo | Monómero |
| Polietileno | PE | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ |
| Polipropileno | PP | $-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$ |
| Poliestireno | PS | $-\text{CH}_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-$ |
| Policloruro de vinilo | PVC | $-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-$ |
| Poliacrilonitrilo | PAN | $-\text{CH}_2-\underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\text{CH}}-$ |
| Polimetacrilato de metilo | PMM | $-\text{CH}_2-\underset{\text{COOCH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{CH}}}-$ |

Nota. Adaptado de (Camuña, 2013)

Un polímero termoplástico puede calentarse desde el estado sólido hasta el estado líquido viscoso y después enfriarse hasta volver a ser sólido, y que es posible realizar muchas veces este ciclo de calentamiento y enfriamiento sin que el polímero se degrade. La razón de esta propiedad es que los polímeros consisten en macromoléculas lineales (o ramificadas) que no se entrecruzan cuando se calientan. Por el contrario, los termofijos y elastómeros pasan por un cambio químico si se les calienta, con

entrecruzamiento de sus moléculas y transformación permanente de estos polímeros. (Groover, 2007)

Termofijos: Los polímeros termofijos son aquellos que se endurecen por medio del calor, siendo necesario en algunos casos el empleo de presión para ser moldeados, pero a diferencia de los termoplásticos, los termofijos no son regenerables por el calor como los termoplásticos. Estos polímeros son más resistentes, aunque más frágiles que los termoplásticos. (Madrigal, 2011)

Los polímeros termofijos son materiales más duros y resistentes que los termoplásticos. Una vez moldeados no pueden volver a cambiar su forma, ya que no se ablandan al calentarlos. Por ello no son reciclables. Al aumentar la temperatura se produce un entrecruzamiento entre las distintas cadenas moleculares contiguas, lo que explica sus propiedades, entre ellas:

- Son insolubles
- No se funden
- Elevada resistencia térmica frente a agentes químicos
- Son duros y rígidos
- A temperaturas muy altas, pueden degradarse por rotura de los enlaces covalentes entre las cadenas moleculares.

Son ejemplos de materiales termoestables las siliconas, algunos tipos de poliéster y materiales fenólicos como la bakelita o el resinox. (Camuña, 2013)

Elastómeros: son polímeros que cuentan con la particularidad de ser muy elástico pudiendo incluso, recuperar su forma luego de ser deformado. Debido a estas características, los elastómeros son el material básico de fabricación de otros materiales como la goma, ya sea natural o sintética, y para algunos productos adhesivos. (Madrigal, 2011)

A modo más específico, un elastómero, es un compuesto químico formado por miles de moléculas denominadas monómeros, los que se unen formando enormes cadenas. Es gracias a estas grandes cadenas que los polímeros son elásticos ya que

son flexibles y se encuentran entrelazadas de manera muy desordenada. (Madrigal, 2011)

Estos materiales presentan gran flexibilidad debido a que las cadenas de polímeros se encuentran enrolladas entre sí. Pueden ser deformados y recuperar fácilmente su forma inicial. La estructura de las moléculas del monómero presenta un doble enlace, lo que explica la flexibilidad antes mencionada. Son ejemplos de elastómeros el polibutadieno (PB), estireno-butadieno (GRS), acrilonitrilo-butadieno (NBR), cloropreno (CR) y polisiloxano (SIL). (Camuña, 2013)

1.2.1.1 Polímeros comúnmente usados.

Los termoplásticos se pueden mezclar con una amplia gama de polímeros. La mezcla de polímeros es una forma fácil de obtención de nuevo material hecho a medida a partir de polímeros existentes para lograr propiedades deseadas o específicas. Los termoplásticos comúnmente más usados son el polietileno de alta densidad (PEAD), poli (tereftalato de etileno) (PET) y el polipropileno (PP). (Agwuncha et al., 2017)

Los termoplásticos son el polímero principal (matriz base) y se pueden mezclar con polímero sintético o natural para lograr propiedades deseadas. Los pesos se combinan en términos de composición porcentual un 60, 40 o 70, 30 % (60, 70 refiriéndose a la matriz base y 40, 30 a otro tipo de polímero). Esta relación porcentual de pesos se encuentra demostrada por investigadores que son adecuados para lograr obtener propiedades deseadas en los termoplásticos de interés. (Agwuncha et al., 2017)

1.1.5.7.4 Poli (tereftalato de etileno) (PET).

El poli (tereftalato de etileno) (PET) es el más comúnmente polímero termoplástico usado. A menudo se llama solo "Poliéster", y esto causa confusión, porque las resinas de poliéster son materiales termoestables. El poli (tereftalato de etileno) (PET) es un polímero transparente, con buenas propiedades mecánicas y buenas estabilidad dimensional bajo carga variable. Además, posee buenas propiedades de barrera contra gases y buena resistencia química. Las propiedades del poli (tereftalato

de etileno) (PET) mencionadas anteriormente causan su amplia aplicación; en forma de botellas, películas termoestabilizadas (por ejemplo, condensadores, gráficos, base de película y cintas de grabación, etc.) y componentes eléctricos. (Sulyman et al., 2016)

El PET también se utiliza para la producción de fibras para una amplia gama de aplicaciones en la industria textil. Además de esto, pertenece a un termoplástico con excelentes propiedades físicas y constituye alrededor del 18 % del total de polímeros producidos en todo el mundo y más del 60 % de su producción se usa para fibras sintéticas y botellas, que consume aproximadamente el 30 % de la demanda mundial de PET. (Sulyman et al., 2016)

El tereftalato de polietileno (PET) es el material más comúnmente utilizado para hacer botellas de plástico transparente en las que se encuentra agua embotellada. Las botellas de PET también son de uso generalizado como envases para bebidas gaseosas, bebidas deportivas, y condimentos como vinagre. Las botellas de PET también se utilizan comúnmente para el envasado de productos cosméticos, tales como champú, particularmente cuando tales productos se venden en botellas de plástico transparente. (Sax, 2010)

El PET es totalmente reciclable y seguro de usar con alimentos. El filamento reciclado es vendido comercialmente por la compañía B-PET desde 2015. (Pakkanen et al., 2017)

El PET reciclado o posconsumo podría causar problemas medioambientales debido a su propiedad no biodegradable y gases liberados por incineración. Por lo tanto, encontrar formas efectivas de reutilizar botellas de PET de desecho y mejorar la tasa de reciclaje se está volviendo muy importante para sostenibilidad del medio ambiente. (Ge et al., 2014)

Se han realizado estudios en años recientes para convertir los residuos de PET en materiales de construcción determinando que existen tres formas principales de reciclar botellas de PET como materiales de construcción, incluida la despolimerización de botellas de PET en resina de poliéster insaturado, uso de fibra de PET como refuerzo

de hormigón y sustitución de agregado parcial con desechos de PET. Entre estos métodos, el uso de residuos de PET botellas como agregado en hormigones de cemento Portland ordinario (OPC) o los morteros podrían proporcionar una forma eficaz de reciclar botellas de PET de desecho. (Ge et al., 2014)

1.1.5.7.5 Polietileno de alta densidad (PEAD).

El polietileno de alta densidad (PEAD) es un tipo de resina termoplástica con un excelente rendimiento integral, con una mayor dureza, resistencia a la tracción y temperatura de punto de ablandamiento por calor, así como mejores propiedades de procesamiento, resistencia química y al agua. Por lo tanto, este tipo de polímero se aplica ampliamente en la vida cotidiana, la industria y la agricultura. Por lo general, se usan partículas inorgánicas rígidas para llenar el HDPE, con el fin de mejorar sus propiedades, disminuir su costo, y obtener compuestos con buena rigidez y alta resistencia. (Liang & Yang, 2007)

El polietileno de alta densidad (PEAD) es uno de los polímeros más utilizados debido a sus vastas aplicaciones en muchos campos. Debido a su biodegradabilidad y baja vida útil, el HDPE contribuye significativamente al problema de los residuos en las administraciones municipales. Para evitar la contaminación ambiental con los desechos de este material, debe reciclarse y recuperarse. (Kumar et al., 2011)

El polietileno de alta densidad (PEAD) es reciclable y posee codificación número 2, se lo utiliza principalmente para envases no alimenticios, tuberías y madera plástica. La energía total usada anualmente para producir HDPE virgen es de 124 mil millones de Megajulios (MJ), mientras que la energía utilizada para producir HDPE reciclado es del 24 % menos que el polímero virgen; esto indica que hay un enorme desperdicio de recursos energéticos y materiales por no reciclar el HDPE. (Kreiger et al., 2014)

El bajo costo del polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado, y el diseño de productos los hacen más útiles en un mundo en desarrollo. Se puede utilizar una impresora 3-D autorreplicante para hacer tecnologías apropiadas para la generación de energía, distribución de agua, utensilios, plantillas de zapatos, partes de equipos médicos, partes

de filtros de agua, así como para la fabricación de repuestos. Una preocupación importante en el mundo desarrollado es la distribución del agua y la agencia federal independiente los Estados Unidos “Cuerpo de la Paz” tiene por objetivo instalar riego por goteo en lugares donde el agua es limitada, utilizándola eficientemente sin mucha pérdida por evaporación. (Kreiger et al., 2014)

Las impresoras 3-D se pueden usar para hacer piezas y accesorios para riego por goteo, potencialmente cambiando la escasez de agua en países en desarrollo y resolviendo la crisis alimentaria en muchas áreas; tener la capacidad de hacer estas piezas o productos útiles a partir de residuos reciclados, no solo tiene el potencial de reducir radicalmente el impacto ambiental de productos que contienen PEAD, sino también reducir sustancialmente los costos del desarrollo de las comunidades mundiales. (Kreiger et al., 2014)

1.1.5.7.6 Polipropileno (PP).

El polipropileno es el más ligero de los plásticos importantes, con una densidad de 0,905. Su alta cristalinidad le proporciona una elevada resistencia a la tracción, rigidez y dureza. La elevada relación de resistencia a peso resultante es ventajosa para muchas aplicaciones. Los artículos acabados tienen usualmente un brillo nuevo y una alta resistencia al deterioro. El elevado punto de fusión del polipropileno permite que las piezas bien moldeadas sean esterilizables y el polímero conserva una alta resistencia a la tracción y a temperaturas elevadas. (Billmeyer, 1975)

Las aplicaciones de los moldeados por inyección, incluida la amplia utilización en el campo del automovilismo y herramientas, suponen casi la mitad de la producción de polipropileno. Otro tercio se emplea como filamentos (sogas, cordelería y redes) y fibras para alfombras. Su uso para películas queda muy por detrás de éstos. (Billmeyer, 1975)

Las fibras de polipropileno se utilizan ampliamente en aplicaciones de ingeniería civil durante muchos años. Estas fibras se utilizan en el hormigón como refuerzo secundario tridimensional. Debido a la adhesión entre fibras de polipropileno y betún, el

mecanismo de refuerzo en el hormigón asfáltico es de alguna manera diferente. (Ge et al., 2014)

Las fibras de polipropileno se utilizan ampliamente como refuerzo agente y tridimensional en hormigón. De esta manera, el hormigón se vuelve más resistente y duradero. Sin embargo, estas fibras de reforzamiento no pueden reemplazar la malla de alambre. Por lo tanto, las fibras de polipropileno funcionan como refuerzo secundario aumentando la economía al reemplazar parcialmente las fibras de acero. Además, en los Estados Unidos se utilizan como modificador de hormigón asfáltico. (Ge et al., 2014)

El Departamento de Transporte del Estado de Ohio (ODOT) ha publicado un estándar para el uso de fibras de polipropileno en hormigón asfáltico de alto rendimiento. En esta norma, se proporcionan las instrucciones detalladas sobre la producción, tendido y compactación de asfalto Hormigón con fibras de polipropileno. (Ge et al., 2014)

Las ventajas de usar polipropileno como matriz son su temperatura de procesamiento relativamente baja que es esencial debido a baja estabilidad térmica de las fibras naturales y sus buenas propiedades a menor costo. Los tejidos son uno de los productos más utilizados como refuerzos en resinas para muchas aplicaciones ya que poseen una buena combinación de fuerza, ligereza y flexibilidad en comparación con los materiales convencionales. (Ge et al., 2014)

1.2.1.2 Polímeros biodegradables en impresión 3D.

Los polímeros biodegradables se han utilizado ampliamente en la impresión 3D y han promovido enormemente el desarrollo de campos biomédicos debido a su biocompatibilidad y biodegradabilidad. El desarrollo de la biotecnología y la tecnología médica ha establecido requisitos de estándares más altos para materiales biomédicos además de que los nuevos polímeros biodegradables con propiedades específicas se encuentran con una excelente demanda de adquisición. (Tian et al., 2012)

Los polímeros biodegradables se utilizan en envases en la agricultura, medicina y otras áreas y en los últimos años ha aumentado el interés por los mismos. Se pueden

distinguir dos clases de polímeros biodegradables: polímeros naturales y sintéticos. (Vroman & Tighzert, 2009)

La utilización de polímeros como biomateriales ha impactó el avance de la medicina moderna. Específicamente, los biomateriales poliméricos que son biodegradables ofrecen la ventaja significativa de poder descomponerse y eliminarse una vez que hayan cumplido su función. Las aplicaciones son amplias con polímeros degradables que se utilizan clínicamente como cirugía suturas e implantes. Para adaptarse a la demanda funcional, los materiales deben seleccionarse en base a las propiedades físicas, químicas, biológicas, biomecánicas y de degradación deseadas. (Ulery et al., 2011)

Los materiales biodegradables que pueden sufrir degradación son comúnmente empleados para fabricar andamios de ingeniería de tejidos, mediante técnicas que incluyen la impresión 3D personalizada. Los polímeros biodegradables se definen como polímeros que pueden degradarse por microorganismos en el medio ambiente o por el fluido biológico. El polímero sintético biodegradable más utilizado para andamios 3D en ingeniería de tejidos es el poli (ácido láctico) (PLA) y se detalla en la siguiente sección. (Hung et al., 2014)

1.1.5.7.7 Poli (ácido láctico) (PLA).

El poli (ácido láctico) es un poliéster termoplástico compostable y de base biológica que se evolucionó hasta convertirse en un material básico competitivo durante la última década. (Saeidlou et al., 2012) El PLA es un poliéster alifático termoplástico que puede derivarse de recursos renovables como la papa, el almidón, la caña de azúcar y el maíz. El poli (ácido láctico) (PLA) ofrece una amplia gama de aplicaciones de productos básicos como botellas, bandejas, contenedores, etc. Además, puede procesarse mediante moldeo por inyección, moldeo por soplado, o ser extruido en películas, fibras y láminas. Este material está destinado para la fabricación de productos

en impresoras 3D como materia prima a las especificaciones del fabricante. (F. S. Cruz et al., 2017)

El ácido láctico, el componente monomérico del PLA, es producido por conversión de azúcar o almidón obtenido de fuentes vegetales (por ejemplo, maíz, trigo o arroz) usando ya sea fermentación bacteriana o vía petroquímica. (Rasal et al., 2010)

El poli (ácido láctico) (PLA) es el más investigado y utilizado poliéster termoplástico biodegradable y renovable, con potencial para reemplazar los polímeros convencionales basados en petroquímicos. En los últimos tiempos, varias tecnologías basadas en PLA han surgido con un énfasis en el logro de propiedades químicas, mecánicas y biológicas equivalente o superior a los polímeros convencionales. La necesidad frecuente de un químico o modificación física del PLA para lograr propiedades adecuadas para su consumidor previsto. Sin embargo, las aplicaciones biomédicas han exigido una atención significativa en la última década. (Rasal et al., 2010)

El PLA es un material muy frágil con menos del 10 % de elongación a la rotura. Aunque su resistencia a la tracción y módulo elástico son comparables a poli (tereftalato de etileno) (PET), la escasa tenacidad limita su uso en las aplicaciones que necesitan plástico de deformación a niveles de tensión más altos (por ejemplo, tornillos y placas de fijación de fracturas). (Rasal et al., 2010)

1.2.1.3 Sistema de codificación de los polímeros.



Los códigos de reciclado universalmente aceptados y reúne las principales características y usos de los materiales que se reciclan (ver Tabla 1). (Castells & Jurado, 2012)


Tabla 1

Código y Características de los Polímeros para el Reciclado

| Código de Reciclado | Propiedades | Aplicaciones del Envasado | Aplicaciones para el Reciclado |
|---|--|---|--|
|  | <p>Poli (tereftalato de etileno) (PET, PETE), también referido genéricamente como poliéster. Transparencia, buenas propiedades como barrera al gas y la humedad, dureza y resistencia al calor. Se hunde en el agua, por lo que se separa del polietileno (PE) porque este último flota.</p> | <p>Botellas de refrescos y especialmente agua, así como otros envases de productos perecederos como mantequilla, salsas, comida precocinada para horno.</p> | <p>Sobre todo, en la elaboración de textiles no tejidos, moquetas, fibras de relleno para almohadas y acolchados diversos, cintas de audio/video, geotextiles.</p> |
|  | <p>polietileno de alta densidad PEAD. Rigidez, resistencia al ataque químico y a la humedad, permeabilidad al gas, facilidad de procesado. El PEAD pigmentado tiene mayor resistencia a la fractura que el no pigmentado.</p> | <p>Botellas de leche, zumo, cosméticos, detergentes, bolsas de envase.</p> | <p>Botellas de detergentes, aceite para automoción, tuberías, macetas, cubos, perfiles y sustituto de madera: bancos, suelos, vallas etc.</p> |

| Código de Reciclado | Propiedades | Aplicaciones del Envasado | Aplicaciones para el Reciclado |
|--|--|--|---|
| <p>The image shows a yellow recycling symbol consisting of three chasing arrows forming a triangle, with the number '3' in the center. Below the symbol, the letters 'PVC' are written in a bold, yellow, sans-serif font.</p> | <p>Poli cloruro de vinilo (PVC). Excelente resistencia al ataque químico, a la exposición solar y la intemperie, al calor, buen aislante y gran resistencia mecánica. Transparencia y facilidad de mezclado con otros componentes. Lo hay flexible y rígido en función de las aplicaciones a que se destina.</p> | <p>El rígido se usa en botellas y todo tipo de envase transparente, tuberías, carpintería para construcción y reversos de moquetas. El flexible se usa en blisters, film (bolsas de sangre y accesorios de oficina) tubos de aplicación en medicina, recubrimiento de cables, pavimentos sintéticos, piel sintética, pinturas y recubrimientos. En general, aplicaciones que requieren de buenas propiedades aislantes y resistencia al calor.</p> | <p>Alfombrillas, tuberías, estanterías de poca calidad de diseño, pavimentos, cajas eléctricas, conos y elementos varios.</p> |
| <p>The image shows a green recycling symbol consisting of three chasing arrows forming a triangle, with the number '4' in the center. Below the symbol, the letters 'LDPE' are written in a bold, green, sans-serif font.</p> | <p>Polietileno de baja densidad PEBD. Químicamente similar al PEAD, pero menos denso y más flexible, lo que determina sus aplicaciones. resistencia, transparencia media, flexibilidad, barrera a la humedad, facilidad de procesado y sellado.</p> | <p>Tapas flexibles para envase, botellas flexibles (miel, mostaza), film para todo tipo de bolsas (comida, fundas de ropa, bolsas de envío postal).</p> | <p>Envoltorios para transporte (menor calidad de diseño), cubos, macetas, perfiles, y sustituto de madera.</p> |

| Código de Reciclado | Propiedades | Aplicaciones del Envasado | Aplicaciones para el Reciclado |
|---|---|--|--|
|  | <p>Polipropileno (PP, Buena resistencia química, alto punto de fusión y por tanto resistencia al calor, dureza y resistencia, barrera a la humedad.</p> | <p>En aplicaciones tanto flexibles como rígidas que se requiera resistencia al calor, como componentes para automoción, contenedores de líquidos calientes. También en fibras, botellas de productos variados.</p> | <p>Carcasas de baterías de vehículos, luces de señalización, fibras de escobas y cepillos, rejillas y rastrillos o herramientas y piezas de fricción, bandejas, palets, etc.</p> |
|  | <p>Poliestireno (PS) Puede ser rígido o expandido (EPS). Gran transparencia, propiedades aislantes y facilidad de procesado. Versátil, con punto de fusión relativamente bajo y frágil.</p> | <p>Expandido: envase de protección, bandejas y vasos desechables, aislante en construcción. Rígido: cajas, tapas y contenedores, como cajas de CD, vajilla y cubertería desechable, envases de yogur, huevos.</p> | <p>Interruptores eléctricos, aislante térmico, material de oficina rígido, perchas de ropa. El expandido se usa como aislante en construcción y embalaje de protección en aplicaciones de menor calidad de diseño.</p> |

| Código de Reciclado | Propiedades | Aplicaciones del Envasado | Aplicaciones para el Reciclado |
|---|--|---------------------------|--|
|  | Utilizado para materiales distintos a los anteriores o para mezclas complejas o composites en los que los materiales anteriores no son claramente predominantes. | Todo tipo de aplicaciones | Aplicaciones en los que no se requiere pureza del material reciclado, como perfiles sustitutos de madera. Los materiales reforzados con fibras no se reciclan. |

Nota. Obtenido de Castells & Jurado, 2012

1.2.2 Metales

Los metales y compuestos metálicos más comunes son los derivados de titanio, aluminio y cobalto. Uno de los metales más fuertes para la impresión 3D es el acero inoxidable en forma de polvo para procesos de sinterización y fusión de haz de electrones. El acero inoxidable es naturalmente plateado, pero puede ser recubierto con otros materiales para dar aplicaciones de efecto dorado o bronce en todo el sector de la joyería. (Pandian & Belavek, 2017)

Una estrategia para crear una tecnología de impresión 3D metálica accesible es desarrollar procesos de impresión alrededor de nuevos materiales fuera de las clases tradicionales de metales. Un ejemplo destacado son los vidrios metálicos a granel (BMG). La estructura amorfa de los BMG da como resultado una alta resistencia y límites elásticos, que a menudo se combina con otras propiedades deseadas, como la alta tenacidad a la fractura y alta resistencia a la corrosión. Único entre los metales, los BMG se relajan en un líquido (sobreenfriado) al calentarse por encima de la temperatura de transición vítrea. (Gibson et al., 2018)

1.2.3 Cerámica

La cerámica es un grupo relativamente nuevo de materiales que se pueden usar para la impresión 3D con varios niveles de éxito. Las piezas cerámicas deben someterse a un postprocesamiento, al igual que cualquier pieza cerámica hecha con métodos tradicionales de producción, cocción y acristalamiento. (Pandian & Belavek, 2017)

La impresión 3D se puede usar directamente para fabricar objetos de cerámica. El procesamiento directo de cerámica se realiza con una suspensión de aproximadamente 40-55 % en peso de cerámica dispersa normalmente en formulación fotopolimerizable que contiene monómeros y multifuncionales, así como adecuados disolventes y agentes dispersantes. Se formó la "parte verde" por la impresión 3D que debe someterse a un curado térmico de varios pasos para proporcionar el objeto terminado. En el primer paso, agua y otro material de bajo peso molecular. Los componentes de peso se volatilizan. En el segundo paso realizado a una temperatura típicamente entre 400 y 500 ° C, la porción orgánica de la suspensión se quema. En el paso final, se sinteriza a una temperatura normalmente superior a 1000 ° C dependiendo de la cerámica utilizada. La rampa térmica debe ser realizado lentamente para reducir el riesgo de grietas. Al final la temperatura y la velocidad de calentamiento utilizadas para la sinterización se pueden utilizar para controlar la porosidad de la parte final. (Ligon et al., 2017)

Para exigentes aplicaciones de ingeniería, las porosidades de menos del 2 % son generalmente necesarias. Las piezas funcionales de cerámica son un campo en crecimiento para la impresión 3D, donde se puede producir partes complejas con tamaños de características milimétricas. En la Figura 16 proporciona una colección de impresión 3D de piezas producidas de cerámica incluyendo Oxido de Aluminio Al_2O_3 , Dióxido de zirconio ZrO_2 y Fosfato de calcio $Ca_3(PO_4)_2$, donde el último está destinado al tejido óseo en aplicaciones de ingeniería. (Ligon et al., 2017)

Figura 16*Piezas de Cerámica*

Nota. Adaptado de (Ligon et al., 2017)

1.2.4 Biomateriales

Son materiales de origen biológico en lugar de combustibles fósiles. Se está realizando una gran cantidad de investigación sobre el potencial de los materiales biológicos de impresión 3D para una gran cantidad de aplicaciones médicas. El tejido vivo se está investigando en varias instituciones líderes con miras a desarrollar aplicaciones que incluyan la impresión de órganos humanos para trasplantes, así como tejidos externos para reemplazar partes del cuerpo. (Pandian & Belavek, 2017)

Los biomateriales naturales, como el colágeno, el quitosano, el ácido hialurónico, el alginato, etc., se usan ampliamente debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad y abundante disponibilidad. La degradación de los biomateriales es una de las características importantes de los polímeros disponibles de forma natural. Como estos biomateriales están presentes en la matriz extracelular (ECM), las células tienen buena compatibilidad y respuesta de crecimiento. El colágeno es uno de los biomateriales naturales más utilizados en andamios en diversas aplicaciones. (Jammalamadaka & Tappa, 2018)

Un biomaterial de impresión 3D ideal debe ser biocompatible, fácilmente imprimible con tasas de degradación ajustables e imitar morfológicamente el tejido vivo.

La selección del biomaterial para un mecanismo de impresión 3D depende de la aplicación del producto final. Por ejemplo, el biomaterial utilizado para aplicaciones ortopédicas u odontológicas debe tener una alta rigidez mecánica y tasas de biodegradación prolongadas. (Zhu et al., 2016)

Por el contrario, para aplicaciones dérmicas u otros órganos viscerales, el biomaterial utilizado debe ser flexible y tener tasas de degradación más rápidas. La mayoría de los biomateriales utilizados en la tecnología médica actual de impresión 3D, como los metales, los polímeros duros y los compuestos son rígidos y, por lo tanto, se usan ampliamente para aplicaciones de ortodoncia. Los polímeros, incluidos los hidrogeles, se utilizan ampliamente en las células de bioimpresión para la fabricación de tejidos y órganos. El microambiente de hidrogel imita la matriz extracelular de un tejido vivo y, por lo tanto, las células son fácilmente acopladas. (Zhu et al., 2016)

La impresión 3D y sus aplicaciones en ingeniería de tejidos e investigación biomédica es relevante. Si bien la fuente celular y el biomaterial son otros dos componentes claves en la biofabricación 3D para la ingeniería de tejidos, las plataformas de biofabricación 3D y sus productos finales presentan la capacidad de bioimpresión 3D de vanguardia. Las técnicas actuales de bioimpresión 3D que prevalecen, incluida la bioimpresión por inyección de tinta, la bioimpresión por extrusión y la bioimpresión con luz. (Zhu et al., 2016)

Se hace hincapié en los sistemas de bioimpresión asistida por luz recientemente desarrollados, incluida la bioimpresión basada en el procesamiento de luz digital (DLP) y la bioimpresión basada en láser, por su velocidad y resolución de impresión. Los tejidos vascularizados en la impresión 3D representan uno de los mayores desafíos en la ingeniería de los tejidos. (Zhu et al., 2016)

1.2.5 Alimentos

Los primeros intentos de utilizar tecnologías de impresión 3D para el procesamiento de los alimentos fueron reportados en 2001 en una patente que

reclamaba el aditivo fabricación de un pastel diseñado en 3D. No se informó ningún prototipo físico, y no fue hasta unos pocos años, con la introducción de impresoras 3D de código abierto. Uno de los primeros experimentos implementados se basó en la sinterización selectiva de azúcar reportado por el proyecto CandyFab en 2008. (Ligon et al., 2017)

La elección del azúcar como material de construcción no se basaba solo en la comestibilidad, sino más bien por el bajo precio, disponibilidad y seguridad del azúcar. La introducción de la impresora 3D en Fab@home, una de las más influyentes de código abierto, impresoras de bricolaje de bajo presupuesto y basadas en deposición de material similar a la pasta y a la carne, conduciendo a actividades dedicadas a la impresión de materiales alimenticios como glaseado de pasteles, queso procesado, mantequilla de maní y chocolate que es el más común. (Ligon et al., 2017)

Se pueden emplear procesos de sinterización selectiva para solidificar el azúcar en polvo y las formulaciones a base de azúcar (ver Figura 17). Los materiales a base de azúcar también se han procesado utilizando una metodología de aglomerante similar al proceso impresión tridimensional (3DP). El curado inducido térmicamente de la clara de huevo. (Ligon et al., 2017)

Figura 17

Escultura Producida Mediante Sinterización Selectiva por Láser (SLS)



Nota. Adaptado de (Ligon et al., 2017)

Los experimentos con extrusoras para imprimir sustancias alimenticias en 3D han aumentado dramáticamente en los últimos años. Mirando hacia el futuro, se están realizando investigaciones para utilizar la tecnología de impresión 3D para producir comidas completas finamente equilibradas. (Pandian & Belavek, 2017)

1.3 Uso del reciclaje de polímeros en impresoras 3D

El reciclaje de polímeros es una forma de reducir los impactos ambientales de la acumulación de materiales de desecho poliméricos. Sin embargo, a menudo se observan bajas tasas de reciclaje en plantas de reciclaje centralizadas convencionales, principalmente para el desafío de recogida y transporte de polímeros de gran volumen y bajo peso en plantas de reciclaje centralizadas convencionales. Como la democratización de las impresoras 3D de código abierto avanza gracias a iniciativas como los entornos FabLab, Existe un interés creciente en cómo utilizar esta tecnología para mejorar la eficiencia del uso de materias primas. Estudios se han propuesto para reciclar el polímero residual en materia prima para impresoras 3D de código abierto. El reciclaje de polietileno de alta densidad (PEAD) emitido a partir de botellas de jarras de

leche usadas mediante el uso de un filamento de fuente abierta se ha evaluado el sistema del fabricante llamado RecycleBot. (Cruz et al., 2017)

El reciclaje polimérico depende principalmente del tipo de polímero. La recogida de residuos no garantiza el tipo de polímero. Antes de reciclar el problema de compatibilidad tiene que resolverse. En una colección puede haber varios tipos de polímeros. La segregación de polímero debe hacerse para clasificar varios materiales y depende solo del personal de clasificación. La introducción de un polímero en otro puede conducir a la reducción de las propiedades del material reciclado debido a los diferentes puntos de fusión. Por ejemplo, la mezcla de polipropileno (PP) en polietileno de alta densidad (PEAD) aumenta la fragilidad del HDPE. (Singh et al., 2017)

Hunt y colaboradores llevaron a cabo estudios con polímeros reciclados utilizando la impresión 3D, donde fabricaron objetos cuya fuerza importa más que la estética tal es el caso que se puede imprimir llaves funcionales con poliestireno de alto impacto (PAI) reciclado como se muestra en la Figura 18. El símbolo de reciclaje estaba incrustado lo suficientemente profundo como para ser visto fácilmente, pero no demasiado profundo para comprometer la integridad de la llave. (Hunt et al., 2015)

Figura 18

Llave Funcional de Poliestireno de Alto Impacto (PAI)

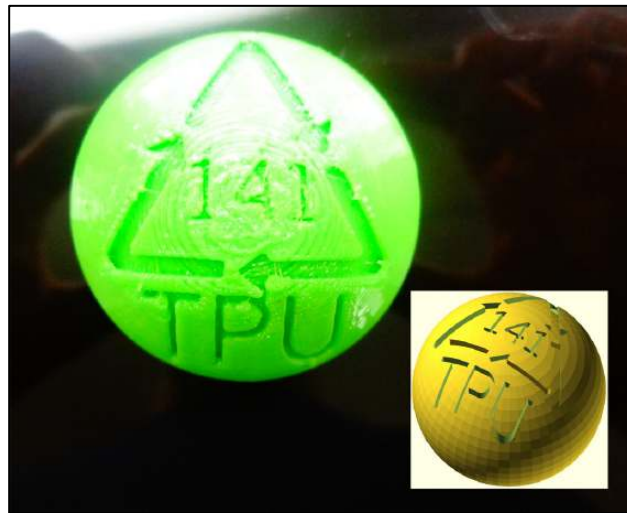


Nota. Adaptado de (Hunt et al., 2015)

Así mismo como observa en la Figura 19 fabricaron una pelota de juguete en elastómero termoplástico (TPE), además de un tapiz de lápiz impreso con poli (ácido láctico) (PLA) reciclado. (Hunt et al., 2015)

Figura 19

Pelota de Juguete de Elastómero Termoplástico (TPE)

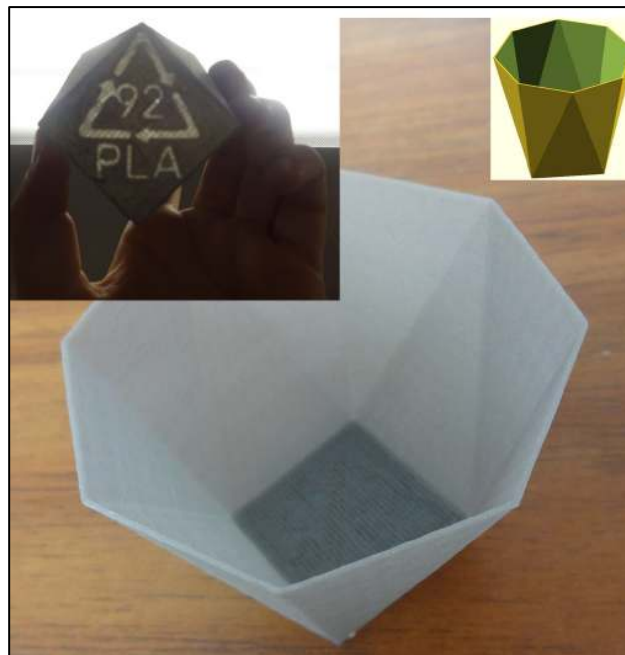


Nota. Adaptado de (Hunt et al., 2015)

Finalmente, un soporte para auriculares impreso con polietileno de alta densidad (PEAD) en “Social Plastic” provisto por Plastic Bank (ver Figura 20). Plastic Bank es una empresa social con el objetivo de aumentar la demanda global de su plástico socialmente responsable o social en productos ecológicos. (Hunt et al., 2015)

Figura 20

Soporte para auriculares de poli (ácido láctico) (PLA)



Nota. Adaptado de (Hunt et al., 2015)

1.3.1 Reciclaje Primario

Reciclaje primario mejor conocido como reextrusión o proceso de circuito cerrado es el reciclaje de un solo tipo de polímero limpio que tiene propiedades cercanas al material virgen. Este proceso utiliza desechos de polímeros que tienen características similares a los productos originales. Solo se puede hacer con producto limpio o semilimpio después de clasificar con éxito este material por parte del personal designado para esta actividad. (Singh et al., 2017)

Este tipo de reciclaje también se conoce como reciclaje in situ, de ciclo cerrado o reprocesamiento. Se realiza al reintroducir los residuos, recortes y rebabas (de origen post-industrial), que se generan durante la producción, al proceso de extrusión que se lleva a cabo en el mismo, con el fin de fabricar productos de material similar. Es una práctica común en muchas plantas productoras de artículos de polímeros, dado que permite reaprovechar residuos limpios y claramente identificados, disminuyendo la necesidad de materias primas. Aunque el proceso es simple, para aplicarlo es

importante realizar pruebas que permitan definir la proporción adecuada de reciclados, de forma que no se afecten las propiedades del producto final. (Morillas et al., 2016)

1.3.2 Reciclaje Secundario

El reciclaje secundario es la transformación del material por medios mecánicos para productos menos exigentes. Los pasos involucrados en el reciclaje secundario son generalmente: Corte / trituración, separación de contaminantes. Después de estos pasos, el material polimérico individual se procesa y se muele para formar una forma granulada. Luego se realiza un prelavado químico mediante el uso de sosa cáustica para eliminar todo tipo de impurezas seguido de un secado. Luego, el producto se recoge, almacena y vende después de la adición de pigmentos y aditivos. (N. Singh et al., 2017)

En esta categoría del reciclaje secundario se encuentra el reciclaje mecánico en el que se agrupan todos los procesos físicos de reciclaje, es decir, aquellos en los que no se modifica la estructura química o la composición de los plásticos. Pueden realizarse a partir de residuos post-industriales o post-consumo, que mediante tratamientos térmicos son transformados nuevamente en pellets, perfiles o madera plástica. (Morillas et al., 2016)

El reciclaje mecánico de polímeros se refiere a procesos que implican la fusión, la trituración o la granulación de residuos poliméricos. Los polímeros deben clasificarse antes del reciclaje mecánico. Se está introduciendo tecnología para clasificar los polímeros automáticamente, utilizando diversas técnicas, como fluorescencia de rayos X, espectroscopía infrarroja e infrarroja cercana, electrostática y flotación. Después de la clasificación, el polímero se funde directamente y se moldea en una nueva forma, o se funde después de ser triturado en pequeñas porciones para obtener polímero en forma de gránulos. (Siddique et al., 2008)

En el reciclaje mecánico tiene como finalidad producir polímero reciclado que se lleva a cabo por medios mecánicos que implican limpieza, separación, lavado y secado, molienda, aglutinación, peletizado y conformado. (Pavlo et al., 2018)

Limpieza: Proceso consistente en tomar los materiales plásticos recuperados, revisarlos y eliminar bolsas con cintas plásticas o pegantes, tintas de impresión y grasas que puedan alterar drásticamente la calidad del producto. (Rubiano Fernández et al., 2013)

Separación Manual: Es una técnica que se sigue aplicando en todo el mundo, incluso en plantas con alto nivel de automatización, debido a que el ser humano puede entrenarse para separar materiales específicos con una alta eficiencia. Su limitación es el volumen de materiales que pueden separarse, que estarán en función de la duración de las jornadas y el número de operarios.(Morillas et al., 2016); El papel, el polvo y otras formas de impurezas se separan del polímero, generalmente en un ciclo. (Al-Salem et al., 2009)

Lavado y Secado: Este paso se refiere a la etapa de prelavado (comienzo de la línea de lavado). El proceso de lavado del polímero ocurre después si se requiere un tratamiento adicional. Ambas etapas de lavado se ejecutan con agua. El lavado químico también se emplea en ciertos casos (principalmente para la eliminación de pegamento del plástico), donde se usan la sosa cáustica. (Al-Salem et al., 2009)

Los productos plásticos a reciclar se lavan en grandes tanques con agua fría y detergentes o en agua caliente, para eliminar impurezas como tierra, grasa, detergentes, o cualquier otra impureza que se pueda eliminar por este medio. (Rubiano Fernández et al., 2013)

Molienda: Manual o mecánicamente se procede a triturar en tamaños lo suficientemente pequeños para su fácil manipulación y para lograr mayores densidades del material a procesar.(Rubiano Fernández et al., 2013); Los polímeros son clasificados y se muelen juntos según su tipo. Este paso generalmente se toma como un primer paso con muchos recicladores en todo el mundo. (Al-Salem et al., 2009)

Aglutinación: Se toma el material ya picado y por medio de una cuchilla giratoria se friccionan los pedazos de material plástico entre sí para elevar su temperatura. Cuando se ha alcanzado una temperatura lo suficientemente alta, se introduce una pequeña cantidad de agua líquida a temperatura ambiente, la cual se mezcla rápidamente con el material plástico debido a la cuchilla giratoria, pero la alta temperatura hace que rápidamente se evapore el agua, lo que trae como consecuencia la formación de pequeños granos asimétricos fácilmente manipulables. Como esta presentación no es la adecuada para su manipulación industrial, se procede con la siguiente etapa. (Rubiano Fernández et al., 2013); posteriormente, el producto se recolecta para ser almacenado y enviado para su posterior procesamiento. (Al-Salem et al., 2009)

Peletizado: Proceso consistente en la formación de granulado de material plástico. Para lograr esto, se utiliza una extrusora, la cual emplea como material de consumo, el previamente aglutinado. Aplicando presión y calor, se funde el material plástico en una cámara diseñada para tal fin dentro de la cual se encuentra un tornillo, el cual facilita la fundición y el transporte del plástico fundido hasta una boquilla donde se da forma cilíndrica al material que sale de la boquilla, se enfría en un tanque de refrigeración, se hala el material por medio de un halador rotatorio y se parte en trozos pequeños con una máquina picadora. De esta manera, los residuos de plástico se suelen vender en forma de granza, pero si esto no sucede, se deben convertir a granza para poder introducirlos en los equipos de reciclaje. (Rubiano Fernández et al., 2013)

Conformado: Consiste en someter a presión al material fundido para hacerlo pasar a través de una matriz. Las materias primas se introducen en forma sólida y en la máquina se funden, se homogenizan y conforman. Dentro de los diversos procesos, se pueden encontrar: Extrusión, Termoformado, Soplado, Inyección, Compresión, Transferencia y Calandrado. (Rubiano Frnández et al., 2013)

1.3.3 Reciclaje Terciario

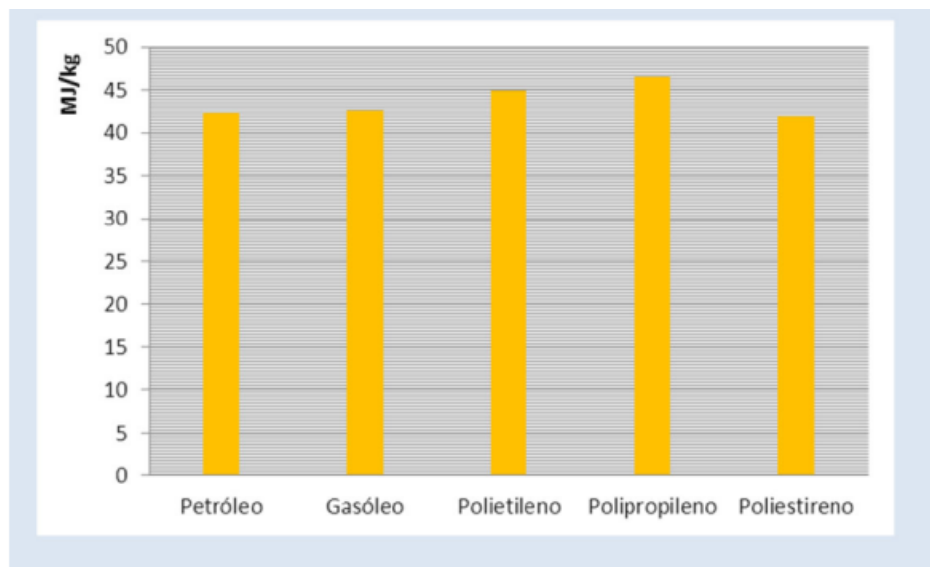
Este proceso también es conocido como reciclaje químico, y esto se debe al hecho de que es probable que ocurra una alteración en la estructura química del polímero. Los productos de reciclaje químico han demostrado ser útiles como combustible. La tecnología detrás de su éxito son los procesos de despolimerización que pueden dar como resultado un esquema industrial muy rentable y sostenible, que proporciona un alto rendimiento del producto y un desperdicio mínimo. (Al-Salem et al., 2009)

El poli (tereftalato de etileno) (PET) y ciertas poliamidas (nylon 6 (PA6) y nylon 66) pueden despolimerizarse de manera eficiente. En particular, el polietileno (PE) ha sido seleccionado como materia prima potencial para tecnologías de producción de combustible (gasolina). Mientras que el polietileno (PE) se fisura térmicamente en gases, líquidos, ceras, compuestos aromáticos y carbón a través de cinco reacciones primarias y dos secundarias para formar cinco productos agrupados. (Al-Salem et al., 2009)

1.3.4 Reciclaje Cuaternario

El reciclaje cuaternario corresponde a la recuperación de energía por incineración. Los tipos de reciclaje primario y secundario se aplican ampliamente. Estos están directamente relacionados con el llamado reciclaje mecánico. (Pavlo et al., 2018)

Los polímeros que forman la base de los plásticos, especialmente en el caso de los termoplásticos, están compuestos principalmente por carbono e hidrógeno. Estos liberan mucha energía cuando reaccionan con el oxígeno durante la combustión, es decir, son muy buenos combustibles, comparables en algunos casos con otros derivados del petróleo (ver Gráfico 2). (Morillas et al., 2016)

Gráfico 2*Capacidad Calorífica de los Termoplásticos*

Nota. Adaptado de (Morillas et al., 2016)

El calor que se libera durante la combustión de los plásticos puede usarse directamente, para calentar, o en algún proceso en el que esa energía haga funcionar una turbina que genere movimiento o electricidad. El proceso puede aplicarse a plásticos mezclados y permite reducir su volumen hasta en un 99 %, disminuyendo los requerimientos de rellenos sanitarios. Durante el mismo se destruyen compuestos como los agentes espumantes, pero al mismo tiempo se genera CO₂ que contribuye al calentamiento global.

Capítulo II

Metodología de la Investigación

En el presente capítulo se detalla el procedimiento a seguir para realizar la valorización del uso de termoplásticos reciclados para impresoras 3D, donde se debe tomar en cuenta procedimientos que van desde la determinación de los métodos de fabricación para impresión 3D hasta lograr identificar el tipo de termoplástico reciclable con las mejores características para realizar dicha impresión.

2.1 Convención de polímeros empleados

Para un mejor manejo de la información sobre los polímeros investigados en el presente trabajo; se usarán las siglas que corresponden a cada material, de acuerdo a como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Simbología de los Materiales

| Estado | Material | Siglas |
|-----------|-------------------------------|---------|
| Virgen | poli (ácido láctico) | (vPLA) |
| | polietileno de alta densidad | (vPEAD) |
| | polipropileno | (vPP) |
| | poli (tereftalato de etileno) | (vPET) |
| Reciclado | poli (ácido láctico) | (rPLA) |
| | polietileno de alta densidad | (rPEAD) |
| | polipropileno | (rPP) |
| | poli (tereftalato de etileno) | (rPET) |

Para realizar la selección de la matriz polimérica se elaboró gráficos comparativos de las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos vírgenes y reciclados; esto con la finalidad de elegir los mejores materiales poliméricos reciclados con un porcentaje mínimo de variación respecto a los materiales poliméricos vírgenes de referencia.

Cabe mencionar que los materiales PEAD, PP, PET son de origen sintético y el PLA es un polímero biodegradable producido por la empresa NatureWorks.

2.2 Tratamiento de los polímeros

Polímeros sintéticos: el procesamiento de los polímeros como el polietileno de alta densidad (PEAD), polipropileno (PP) y poli (tereftalato de etileno) (PET), parte desde la adquisición de pellets vendidos comercialmente, que luego son usados directamente en un proceso de extrusión bajo parámetros del equipo, de la cual se obtiene filamentos con diámetro de 1.75 mm que posteriormente pasan a una impresora 3D mediante la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF). (Schirmeister et al., 2019)

Reciclado: los polímeros reciclados son generalmente obtenidos de material post-consumo y el proceso para la obtención del filamento parte del reciclado de botellas de plástico, primeramente se realiza la limpieza de los residuos de las botellas, posteriormente la separación manual de acuerdo al tipo de polímero al que pertenece el recipiente, luego pasa al lavado y secado seguido de la molienda para finalmente pasar al proceso de extrusión, logrando así obtener el filamento de 1.75 mm de diámetro que es utilizado para la impresión 3D mediante la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF); cabe recalcar que se debe elegir la orientación del objeto antes de ser impreso y esto varía de acuerdo a las dimensiones y a la complejidad del objeto a fabricar que se ve reflejado en el acabado de la superficie y al medir la resistencia a la tracción. (Mosaddek et al., 2018)

Finalmente, para determinar las condiciones de procesamiento del termoplástico reciclable se analizó la información bibliográfica y sugerencias que han sido planteadas

por distintos autores a partir de pruebas térmicas realizadas en investigaciones científicas.

2.3 Identificación de los métodos de fabricación para impresión 3D aplicados a matrices poliméricas

Para desarrollar este primer objetivo se realizará una investigación científica y bibliográfica de los diferentes métodos de fabricación para realizar la impresión 3D, obteniendo las siguientes técnicas de impresión (ver Tabla 3):

Tabla 3

Tecnologías de Impresión con sus Respectivas Técnicas.

| Tecnologías de Impresión | Técnicas | Siglas |
|---|---|--------|
| | Sistema de Estereolitografía | SLA |
| Fotopolimerización | Procesamiento Digital por Luz | DLP |
| | Interfaz de Producción Líquida Continua | CLIP |
| Fusión de lecho de polvo (PBF) | Sinterización Selectiva por Láser | SLS |
| | Multi-Jet Fusión | MJF |
| Inyección de aglutinante (Binder Jetting) | Impresión Tridimensional | EDP |
| Inyección de Material (Material Jetting) | Poly Jet | - |
| | Modelado de Chorro Múltiple | MJM |
| Laminación de Hojas | Fabricación de Objetos Laminados | LOM |
| | Manufactura Aditiva Ultrasónica | UAM |
| Extrusión de Material | Fabricación por Filamento Fundido | FFF |

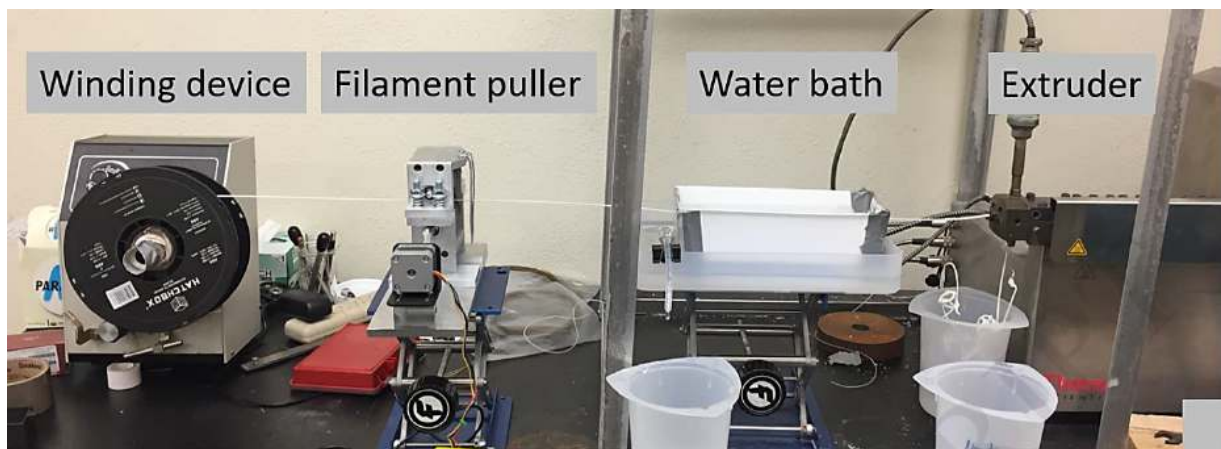
| Tecnologías de Impresión | Técnicas | Siglas |
|-------------------------------------|---------------------------------|--------|
| | Modelado por Deposición Fundida | FDM |
| | Deposición de Metal por Láser | LMD |
| Deposición Directa de Energía (DED) | Deposición Directa de Metal | DMD |
| | Modelado de Ingeniería Láser | LENS |

Para el desarrollo del presente Trabajo de Titulación se ha creído conveniente utilizar la tecnología de impresión correspondiente a la Extrusión del material cuya técnica es la fabricación por filamento fundido (FFF); esto debido a que en la actualidad es una de las técnicas más utilizadas para impresión 3D.

En la Figura 21 se puede observar el proceso de extrusión de filamentos que consta de una extrusora, un baño de agua y un extractor de filamentos. El diámetro del filamento recomendado para la técnica FFF es de 1.75 mm. La técnica FFF es un tipo de proceso de fabricación de forma libre que coloca material fundido capa por capa para construir objetos. En la Figura 22 se ilustra las máquinas de impresión 3D que utilizan la técnica FFF tienen boquillas que derriten y extruyen el filamento a medida que se agrega capa por capa para realiza un prototipado rápido. (Wu et al., 2018)

Figura 21

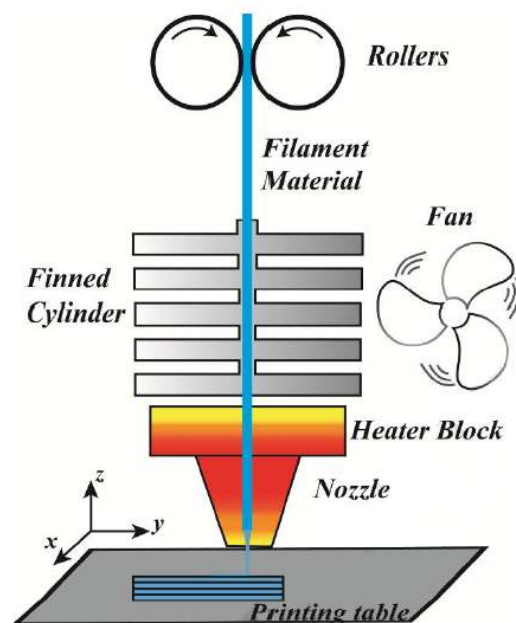
Proceso de Extrusión del Filamento



Nota. Adaptado de (Wu et al., 2018)

Figura 22

Esquema de la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)



Nota. Adaptado de (Wu et al., 2018)

La forma deseada se obtiene mediante un código basado en control numérico que mueve el extrusora a lo largo del plano en el que se realiza la fabricación de cada capa. (Gomez et al., 2017) La técnica FFF ahora se considera indispensable para la fabricación rápida de modelos conceptuales, prototipos funcionales y piezas de uso final personalizadas. (McIlroy & Olmsted, 2017)

2.4 Análisis bibliográfico de pruebas mecánicas

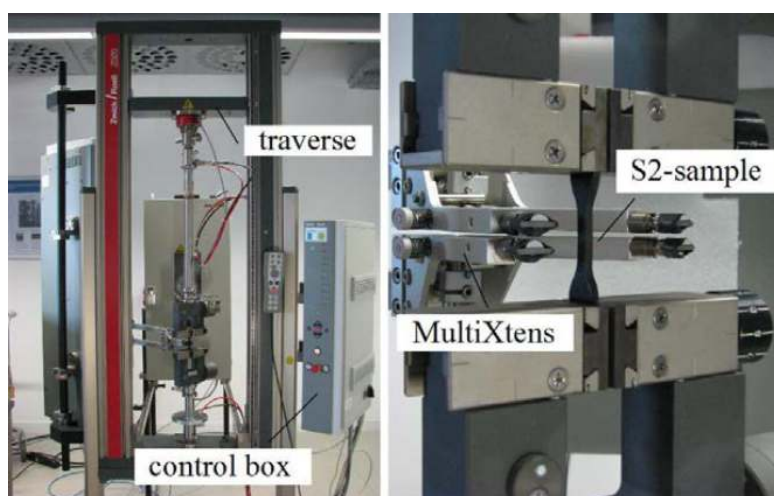
Para el desarrollo de este apartado se realizará una investigación bibliográfica sobre la prueba de tracción, de flexión para varios polímeros, con el fin de valorar aquellos materiales que ofrezcan las mejores características para ser sometidas al proceso de impresión 3D. Para ello, se ha visto conveniente detallar como se realizan cada una de estas pruebas describiendo lo que contempla cada una de sus técnicas.

2.4.1 Prueba de Tracción

Las pruebas de tracción pueden ser realizado para determinar varias propiedades de los materiales; en este caso se realizan en filamentos e impresiones 3D. Dicha prueba se desarrolla empleando una Máquina de Prueba Universal (UTM) generalmente con una celda de carga de 20 kN (Tal como se muestra en la Figura 23) con un extensómetro de longitud de calibre de 2 pulgadas que se usa para registrar el alargamiento con 0.1 MPa de carga inicial. Las pruebas se llevan a cabo a 5 mm/min de desplazamiento como describe la Sociedad Americana para pruebas y Materiales (ASTM) utilizando el Método Estándar ASTM D638-14 para pruebas de tracción del polietileno de alta densidad (PEAD). (Patil et al., 2019)

Figura 23

Máquina Zwick/Roell Modelo Z020



Nota. Adaptado de Kanzenbach et al., 2016

2.4.1.1 Módulo de Young.

En la prueba de tracción, los polímeros se deforman elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la muestra desaparece, la probeta volverá a su longitud inicial; a esto se le conoce como módulo de Young o módulo de Elasticidad y está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos del material. (Smith & Jashemi, 2006)

2.4.1.2 Resistencia a la Tracción.

La resistencia a la tracción es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión-deformación en una probeta llevada a la fractura. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal comúnmente denominada *estricción*, la tensión convencional decrecerá con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura porque la deformación convencional se determina utilizando el área original de la sección transversal de la probeta. Cuanto más dúctil es el material, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente la tensión alejándose del valor de resistencia a la tracción. (Smith & Jashemi, 2006)

2.4.1.3 Elongación a la rotura.

El porcentaje de elongación a la rotura que una probeta soporta durante la prueba de tracción proporciona un valor de la ductilidad del material. Este porcentaje tiene importancia no sólo como medida de la ductilidad, sino también como índice de la calidad del material. Si existe porosidad o inclusiones en el material, o si existe un deterioro debido a un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de elongación a la rotura decrecerá por debajo del valor normal. (Smith & Jashemi, 2006)

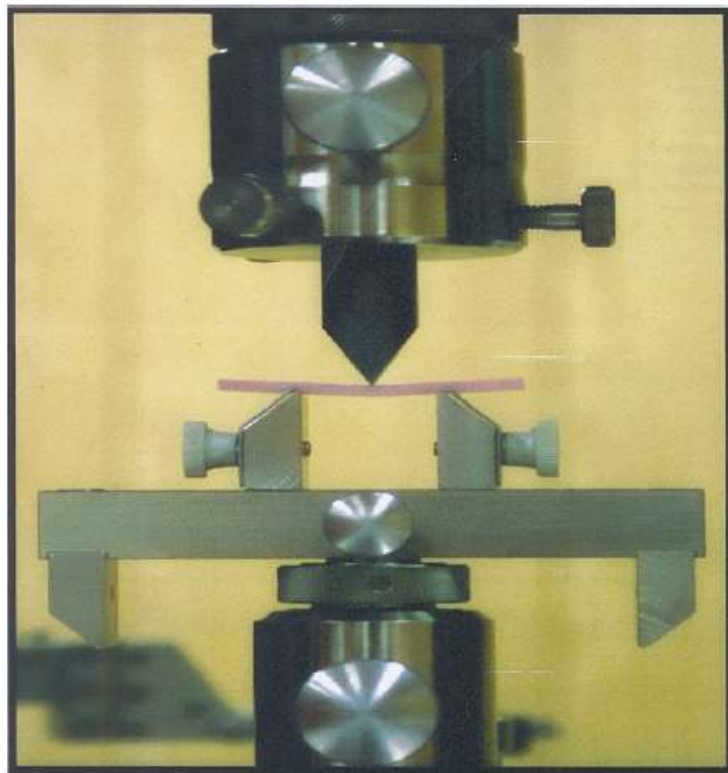
2.4.2 Prueba de Flexión

Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. La prueba de flexión se realiza en filamentos e impresiones 3D usando una máquina de Prueba Universal (UTM) generalmente con una celda de carga de 20 kN tal como se muestra en la Figura 24. Para realizar esta prueba se utiliza un extensómetro de longitud de calibre de 2 pulgadas

que se usa para registrar el alargamiento con 0.1 MPa de carga inicial. Las pruebas se llevan a cabo a 1.54 mm/min de desplazamiento; estas pruebas se realizan en muestras impresas en 3D en la configuración de tres puntos de la probeta como describe la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) utilizando el Método Estándar para pruebas de flexión de polímeros ASTM D790-17. (Patil et al., 2019)

Figura 24

Máquina Zwick/Roell Modelo Z250



Nota. Adaptado de (Sodagar et al., 2013)

2.4.2.1 Módulo de Flexión.

El módulo de flexión es la medida de rigidez del material. Su cálculo se basa en la razón entre el esfuerzo por unidad de superficie y la deformación por unidad de longitud experimentada por la probeta expuesta a flexión. Constituye un valor indicativo de la rigidez del material y es aplicable solamente a condiciones de trabajo que se encuentren dentro de la zona elástica de la curva carga vs deformación. (Spavento et al., 2008)

2.4.2.2 Resistencia a la Flexión.

La resistencia a la flexión también conocido como módulo de rotura es un factor determinante de la calidad del material y podría considerarse como una medida indirecta de la resistencia a la tracción. Esta resistencia se deduce de la magnitud fuerza de rotura a través de una fórmula matemática (fuerza de rotura dividida por el cuadrado del grosor mínimo en la sección de rotura). El resultado del ensayo expresado en Newtons por metros cuadrados (N/m^2 ; Pa), nos aproxima la resistencia a la flexión del material independientemente de su grosor. (Mogollón, 2018)

2.5 Análisis bibliográfico de pruebas térmicas

A través de este apartado se podrá identificar las características térmicas que intervienen el procesamiento de polímeros, con el fin de obtener información sobre las temperaturas o rango de procesamiento en los materiales.

2.5.1 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Para realizar la calorimetría diferencial de barrido (DSC) generalmente se utiliza un equipo diseñado por PerkinElmer generalmente de tipo DSC-600. Las muestras que se analizan pesan aproximadamente 10 mg y se calientan de 0 a 300 ° C con curado isotérmico durante 3 minutos a 300 ° C y posterior se enfrían a 0 ° C a una velocidad de 10 ° C / min. Se realiza el segundo calentamiento de 0 a 300 ° C después de enfriar la muestra a 0 ° C durante 3 min. (Patil et al., 2019)

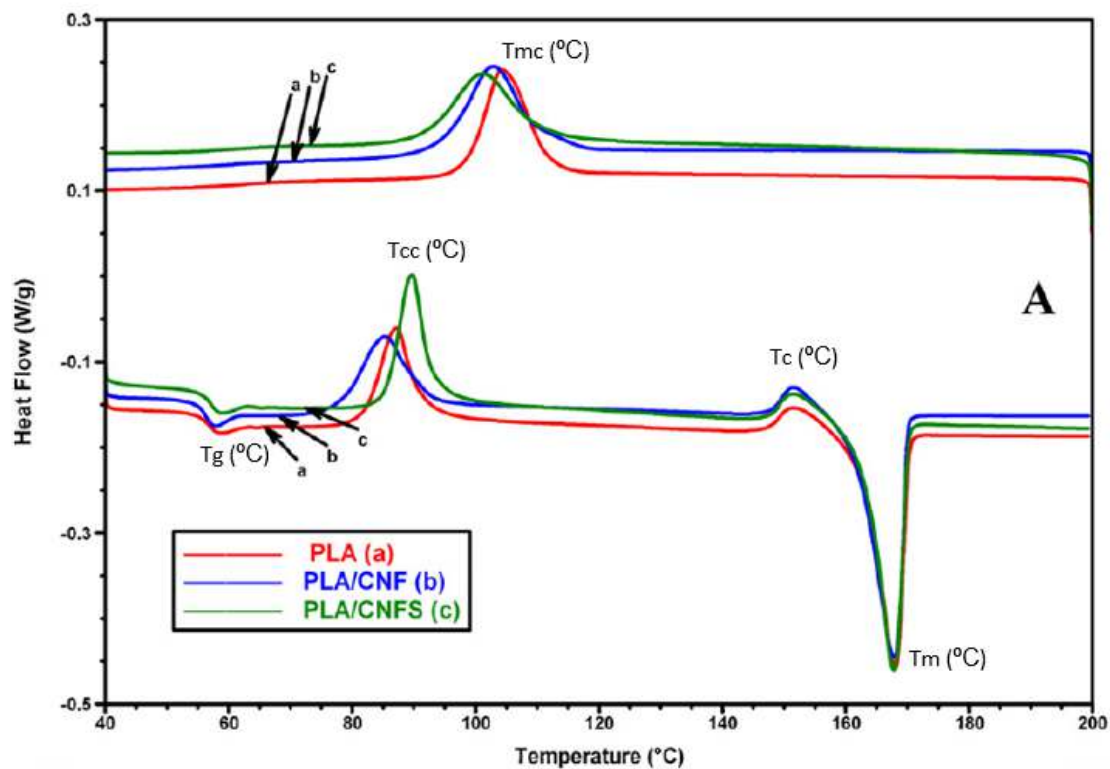
2.5.1.1 Punto de Fusión (Tm).

El punto de fusión es la temperatura a la cual se convierte un material sólido en estado líquido a la presión de una atmósfera. El punto de fusión se indica como un rango de fusión y normalmente la presión se ignora al determinar el punto de fusión. La temperatura a la cual se observa la primera gota de líquido es la temperatura más baja del rango de fusión. La temperatura a la cual la muestra se convierte completamente en un líquido transparente es la temperatura superior del rango de fusión (Medellín, 2009),

tal como se muestra en la Figura 25 donde se observa el valor del punto de fusión para el poli (ácido láctico) (PLA).

Figura 25

Punto de Fusión del Poli (Ácido Láctico) (PLA)



Nota. Adaptado de (Frone et al., 2013)

2.5.1.2 Temperatura de Degradación.

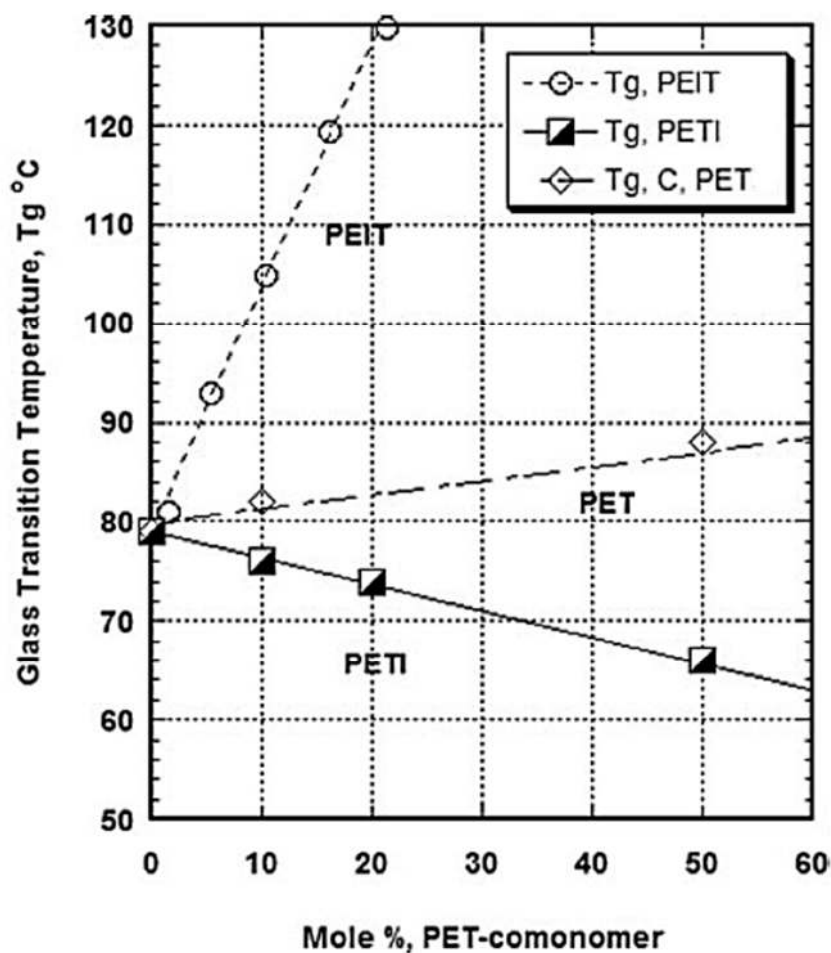
La Temperatura de degradación se puede definir como el proceso mediante el cual la acción de la temperatura provoca una pérdida de propiedades del material, que pueden ser tanto físicas como químicas. Es necesario puntualizar que cualquier polímero es susceptible de sufrir degradación a determinadas temperaturas, si bien los valores a los cuales ésta se produce, varían mucho entre sí. El calor puede proporcionar la energía suficiente para romper los enlaces de la cadena principal del polímero, ruptura que se produce principalmente por las irregularidades estructurales presentes en el mismo, por lo que su cantidad y posición relativa determinarán su estabilidad. (Mexpolímeros, 2010)

2.5.1.3 Temperatura de Transición Vítrea (Tg).

Constituye otro parámetro obtenido a partir del de la calorimetría diferencial de barrido. En la Figura 26 se observa el valor de Tg sobre la curva DSC es escogido como el punto medio en la discontinuidad de la capacidad calorífica. (Mosquera et al., 2015)

Figura 26

Temperatura de Transición Vítrea del Poli (Tereftalato de Etileno) (PET)



Nota. Comparación de la temperatura de transición vítrea vs el porcentaje (%) de mol isosorbida (polímero derivado del maíz necesario para modificar el comportamiento de deformación de copolímeros como lo es el poli (tereftalato de etileno que contiene isosorbida, PEIT). Adaptado de (Gohil, 2009)

La temperatura de transición vítrea (T_g), es el centro del rango de temperaturas donde un termoplástico calentado cambia, después del enfriamiento, de un estado parecido a caucho o cuero al de un vidrio frágil. (Smith & Jashemi, 2006)

Capítulo III

Análisis e Interpretación de Resultados

En este capítulo se establece las características mecánicas y térmicas en base a investigaciones bibliográficas y científicas de termoplásticos tanto de polímeros vírgenes como reciclados; y, que son los siguientes: polietileno de alta densidad (PEAD), polipropileno (PP), poli (tereftalato de etileno) (PET) y poli (ácido láctico) (PLA), y posteriormente un análisis comparativo de dichas propiedades.

3.1 Propiedades mecánicas y térmicas de poli (ácido láctico) (PLA)

3.1.1 Prueba de Tracción

Singh y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con poli (ácido láctico) virgen (vPLA), Ingeo 4043D, dicho material se aplica con frecuencia como materia prima en impresión 3D. Los autores reportaron que la temperatura de procesamiento utilizando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) fue de 180 a 200°C con un diámetro de filamento de 1.75mm. A partir de estas condiciones, obtuvieron la resistencia a la tracción y la elongación a la rotura que se muestran en la Tabla 4. (Singh et al., 2019)

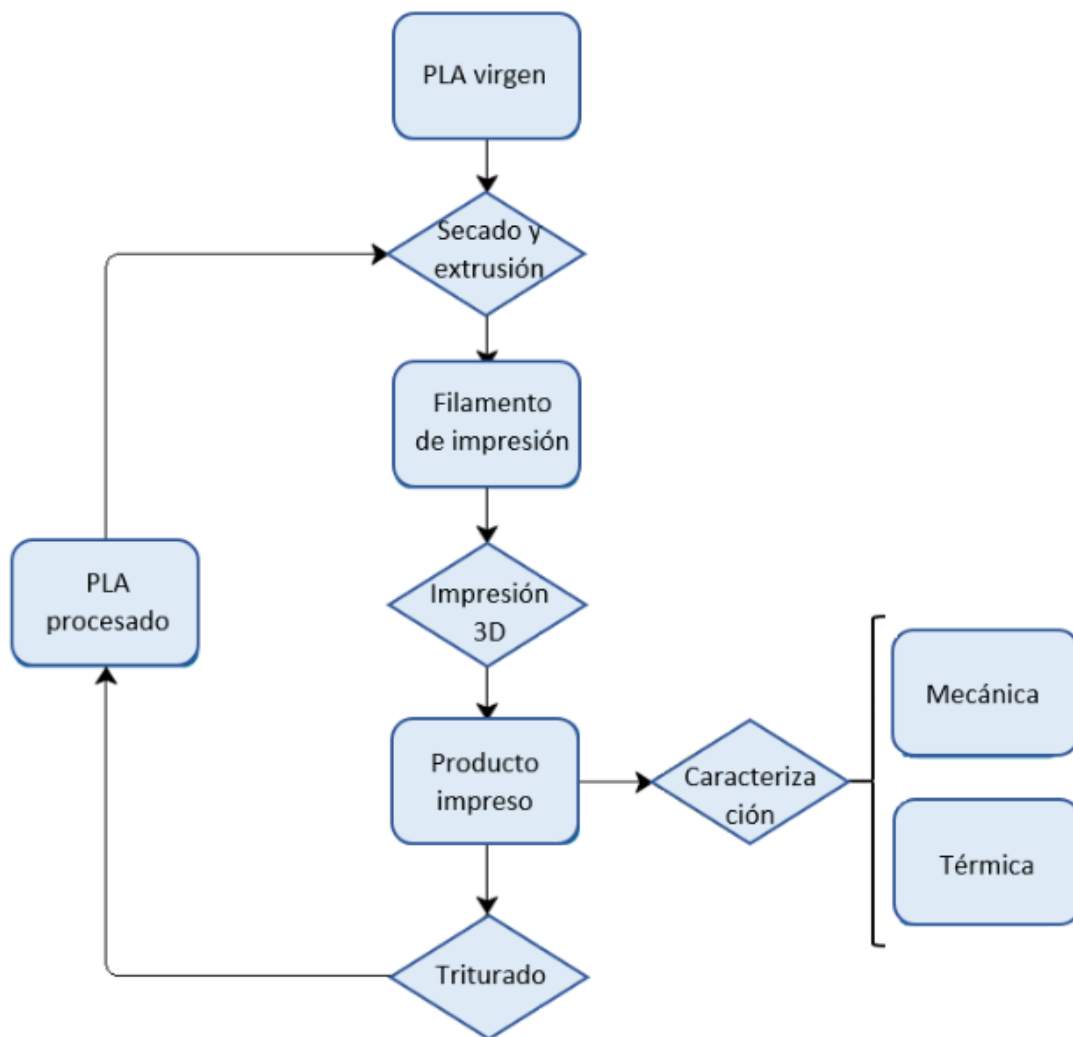
Así mismo, Khudiakova y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con poli (ácido láctico) (vPLA) donde utilizaron una impresora 3D aplicando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) de la cuales se obtuvo el valor del módulo de Young mostrado en la Tabla 4. (Khudiakova et al., 2019)

Por otro lado, Zhao y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con Poli (Ácido Láctico) reciclado (rPLA) Ingeo 4032D empleado como materia prima para impresión 3D en línea como Stro3D (2018) y 3DprintWorks (2018). Para el desarrollo de esta prueba, utilizaron pellets vírgenes de PLA que se extruyeron en filamento y luego fueron sometidos a impresión 3D utilizando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF), el producto impreso en 3D fue triturado y re-extruido en filamento; el mismo que sirvió para fabricar las probetas que permitieron medir las propiedades del

material, dicho proceso se muestra en el Gráfico 3. Los autores reportaron que la temperatura de procesamiento en la zona inicial del extrusor fue de 180°C y la zona final de 200°C. En la Tabla 4 se detalla la resistencia a la tracción y la elongación a la rotura. (Zhao et al., 2018)

Gráfico 3

Esquema de Reciclaje en Circuito Cerrado de PLA que se Utiliza en la Impresión 3D



Nota. Adaptado de (Zhao et al., 2018)

Así mismo, Cruz y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con poli (ácido láctico) reciclado (rPLA), de la misma manera utilizaron pellets vírgenes de PLA se extruyeron en filamento y luego fueron sometidos a impresión 3D utilizando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF), el producto impreso en 3D fue triturado y re-

extruido en filamento; el mismo que sirvió para fabricar las probetas que permitieron obtener el módulo de Young. (Cruz et al., 2017)

De los datos obtenidos para PLA virgen y reciclado se recopila la información mostrada en la Tabla 4.

Tabla 4

Valores de Prueba de Tracción de Poli (Ácido Láctico) (PLA) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Young (MPa) | Resistencia a la Tracción (MPa) | Elongación a la Rotura (%) |
|----------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| vPLA | 3280.00 | 66.00 | 56.00 |
| rPLA | 3213.3 | 30.21 | 2.74 |

Nota. Adaptado de (Singh et al., 2019); (Khudiakova et al., 2019); (Zhao et al., 2018); (Cruz et al., 2017)

3.1.2 Prueba de Flexión

Rajpurohit y Dave llevaron a cabo la prueba de flexión de vPLA, mediante la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF), utilizando una impresora 3D OMEGA Dual Extruder misma que permitió elaborar las probetas para la prueba de flexión, de las cuales se obtuvo los valores el módulo y resistencia a la flexión (ver Tabla 5). (Rajpurohit & Dave, 2018)

De igual manera, Zhao y colaboradores llevaron a cabo la prueba de flexión con rPLA y se caracterizó bajo los mismos parámetros utilizados en la prueba de tracción anteriormente desarrollada, de las cuales se obtuvo los valores del módulo y la resistencia a la flexión (ver Tabla 5). (Zhao et al., 2018)

Tabla 5

Valores de Prueba de Flexión de Poli (Ácido Láctico) (PLA) impreso por la técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Flexión (MPa) | Resistencia a la Flexión (MPa) |
|----------|-------------------------|--------------------------------|
| vPLA | 2504.40 | 68.50 |
| rPLA | 2423.73 | 64.48 |

Nota Adaptado de (Rajpurohit & Dave, 2018); (Zhao et al., 2018)

3.1.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) de poli (ácido láctico)

Zenkiewicz y colaboradores llevaron a cabo la calorimetría diferencial de barrido de vPLA Ingeo 2002D realizando un análisis termogravimétrico de donde se obtuvo los valores de la temperatura de degradación, punto de fusión y temperatura de transición vítrea presentados en la Tabla 6. (Zenkiewicz et al., 2009)

De igual manera, Zhao y colaboradores llevaron a cabo la calorimetría diferencial de barrido para rPLA utilizando el mismo material que se empleó en las pruebas mecánicas realizadas anteriormente como son pruebas de tracción y flexión. En la Tabla 6 se muestra los valores de la temperatura de transición vítrea y punto de fusión. (Zhao et al., 2018)

Por otro lado, Zenkiewicz y colaboradores llevaron a cabo la calorimetría diferencial de barrido para rPLA obteniendo la temperatura de degradación la cual se agrupa junto las temperaturas vítreas y de fusión indicadas anteriormente y que se agrupan en la Tabla 6. (Zenkiewicz et al., 2009)

Tabla 6

Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Poli (Ácido Láctico) (PLA)

| Material | Punto de Fusión T _m (°C) | Temperatura de Degradación (°C) | Temperatura de Transición Vítrea T _g (°C) |
|----------|--|------------------------------------|--|
| vPLA | 150.90 | 339.00 | 59.60 |
| rPLA | 165.64 | 335.60 | 59.86 |

Nota. Adaptado de (Zenkiewicz et al., 2009); (Zhao et al., 2018)

3.2 Propiedades mecánicas y térmicas de polietileno de alta densidad (PEAD)

3.2.1 Prueba de Tracción

Schirmeister y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con polietileno de alta densidad virgen (vPEAD), tipo Hostalen GC7260 produciendo filamentos a partir de gránulos de vPEAD utilizando una extrusora de doble tornillo, y una temperatura de procesamiento en todo el extrusor de 190°C. Con los filamentos fabricados realizaron las probetas para la prueba de tracción obteniendo propiedades como el módulo de Young, resistencia a la tracción y elongación a la rotura (Ver Tabla 7). (Schirmeister et al., 2019)

De igual manera, Lu y Oza llevaron a cabo la prueba de tracción con polietileno de alta densidad reciclado (rPEAD), los mismos que fueron recuperados de detergente y de botellas plásticas. Dicho material se sometió a un proceso de extrusión para obtener probetas y medir sus propiedades como resistencia a la tracción y el módulo de Young, cuyos valores se reportan en la Tabla 7. (Lu & Oza, 2013).

Satapathy & Kothapalli llevaron a cabo la prueba de tracción con rPEAD; para este proceso se usó una extrusora de doble tornillo donde los autores reportaron que temperatura de procesamiento en la zona inicial fue de 140°C y en la zona final de 180°C. Bajo estas condiciones obtuvieron la propiedad de elongación a la rotura que se muestra en la Tabla 7 junto con las otras propiedades de rPEAD mencionadas anteriormente. (Satapathy & Kothapalli, 2015)

Tabla 7

Valores de Prueba de Tracción de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Young (MPa) | Resistencia a la Tracción (MPa) | Elongación a la Rotura (%) |
|----------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| vPEAD | 970.00 | 25.20 | 380.00 |
| rPEAD | 441.20 | 19.10 | 128.02 |

Nota. Adaptado de (Schirmeister et al., 2019); (Lu & Oza, 2013); (Satapathy & Kothapalli, 2015)

3.2.2 Prueba de Flexión

Patil y colaboradores llevaron a cabo la prueba de flexión con vPEAD tipo HD50MA180. Su procesamiento fue por impresión 3D con la técnica de fabricación por filamento fundido donde elaboraron probetas para realizar la prueba de flexión y obtener valores del módulo de flexión (ver Tabla 8). (Patil et al., 2019) Por otro lado, Nwogu y colaboradores llevaron a cabo de igual forma la prueba de flexión obteniendo los valores de la resistencia a la flexión resumidos en la Tabla 8 conjuntamente con el módulo de Flexión. (Nwogu et al., 2019)

Por su parte, Satapathy & Kothapalli llevaron a cabo la prueba de flexión con rPEAD y se procesó bajo los mismos parámetros que en la prueba de tracción anteriormente desarrollada. En la Tabla 8 se detalla los valores del módulo y resistencia a la flexión. (Satapathy & Kothapalli, 2015), los valores presentados corresponden a un proceso de extrusión.

Tabla 8

Valores de Prueba de Flexión de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Flexión (MPa) | Resistencia a la Flexión (MPa) |
|----------|-------------------------|--------------------------------|
| vPEAD | 734.76 | 31.70 |
| rPEAD | 154.03 | 25.08 |

Nota. Adaptado de (Patil et al., 2019); (Nwogu et al., 2019); (Satapathy & Kothapalli, 2015)

3.2.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para polietileno de alta densidad

Dos Santos y colaboradores llevaron a cabo la calorimetría diferencial de barrido para vPEAD donde se obtuvieron los valores del punto de fusión y temperatura de transición vítrea reportadas en la Tabla 9. (Dos Santos et al., 2013).

Así mismo, Huang y colaboradores llevaron a cabo en análisis termogravimétrico de vPEAD realizando un barrido de temperatura de 20 a 700°C, con el fin de identificar la temperatura de degradación del polímero, cuyo valor se reporta en la Tabla 9. (Huang et al., 2017)

De igual manera Satapathy & Kothapalli llevaron a cabo la calorimetría diferencial de barrido del rPEAD. Los autores reportaron una temperatura de barrido de -140°C hasta una temperatura final de 200°C. En la Tabla 9 se detalla los valores del punto de fusión y temperatura de degradación para este material. (Satapathy & Kothapalli, 2015)

Con el fin de identifica la temperatura de transición vítrea del rPEAD, Brandalise y colaboradores llevaron a cabo la prueba de DSC con un barrido de temperatura de -130 a 270 °C, reportando el valor que se muestra en la Tabla 9. (Brandalise et al., 2009)

Tabla 9

Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

| Material | Punto de Fusión T _m (°C) | Temperatura de Degradación (°C) | Temperatura de Transición Vítrea T _g (°C) |
|----------|--|------------------------------------|--|
| vPEAD | 136.00 | 506.90 | -135.00 |
| rPEAD | 134.33 | 484.00 | -120.00 |

Nota. Adaptado de (Dos Santos et al., 2013); (Huang et al., 2017); (Satapathy & Kothapalli, 2015); (Brandalise et al., 2009)

3.3 Propiedades mecánicas y térmicas del Polipropileno (PP)

3.3.1 Prueba de Tracción

Spoerk y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con polipropileno virgen (vPP), tipo SCONA TPPP 9212 GA para la obtención de los filamentos utilizaron un proceso de extrusión con una temperatura de procesamiento en la zona inicial de 175°C y zona final de 185°C. Las probetas ensayadas fueron obtenidas por una impresora 3D por medio de la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF). En la Tabla 10 se detalla los valores obtenidos del módulo de Young y la elongación a la rotura. (Spoerk et al., 2018)

Para el valor de la resistencia a la tracción, Harris y colaboradores llevaron a cabo dicha prueba con vPP, bajo las mismas condiciones de procesamiento detalladas anteriormente. En la Tabla 10 se detalla los valores de la resistencia a la tracción. (Harris et al., 2019)

En el estudio del polipropileno reciclado (rPP), Pickering y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción de dicho material con una temperatura de procesamiento en la zona de alimentación de 150°C y en la zona final de 180°C. En la tabla 10 se detalla los valores del módulo de Young y resistencia a la tracción. (Pickering et al., 2017)

Por su parte, Jansson y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con rPP procesado bajo las mismas condiciones descritas anteriormente, obteniendo la propiedad de elongación a la rotura mostrada en la Tabla 10. (Jansson et al., 2003)

Tabla 10

Valores de Prueba de Tracción de Polipropileno (PP) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Young (MPa) | Resistencia a la Tracción (MPa) | Elongación a la Rotura (%) |
|----------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| vPP | 830.00 | 25.20 | 1631.20 |
| rPP | 1020.00 | 23.32 | 700.00 |

Nota. Adaptado de (Spoerk et al., 2018); (Harris et al., 2019); (Pickering et al., 2017); (Jansson et al., 2003)

3.3.2 Prueba de Flexión

Por su parte, Homkhiew y colaboradores llevaron a cabo la prueba de flexión con vPP y rPP, empleando un proceso de extrusión de doble tornillo con una temperatura de procesamiento en la primera zona de 130°C y la última temperatura de calentamiento de 170°C. En la Tabla 11 se detalla los valores del módulo y resistencia a la flexión. (Homkhiew et al., 2013)

Tabla 11

Valores de Prueba de Flexión de Polipropileno (PP) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Flexión (MPa) | Resistencia a la Flexión (MPa) |
|----------|-------------------------|--------------------------------|
| vPP | 1670.00 | 50.07 |
| rPP | 1270.00 | 37.02 |

Nota. Adaptado de (Homkhiew et al., 2013)

3.3.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para polipropileno

Dos Santos y colaboradores llevaron a cabo la calorimetría diferencial de barrido de vPP obteniendo el valor del punto de fusión (ver Tabla 12). (Dos Santos et al., 2013).

Para el estudio de la temperatura de transición vítrea, Heikkinen y colaboradores ensayaron vPP por medio de DSC con un barrido de temperatura de -30°C hasta una temperatura final de 150°C. En la Tabla 12 se muestra el valor de la temperatura transición vítrea. (Heikkinen et al., 2018). Por otro lado, Rezaei y colaboradores llevaron a cabo un análisis termogravimétrico con vPP donde obtuvieron el valor de la temperatura de degradación, el mismo que corresponde al inicio en la ruptura de la cadena molecular o escisión cuyo valor se reporta en la Tabla 12. (Rezaei et al., 2009)

En lo que concierne al polipropileno reciclado (rPP), AlMaadeed y Colaboradores llevaron a cabo la calorimetría diferencial de barrido de este material en un rango de temperatura de -20°C hasta una temperatura final de 200°C para obtener el punto de fusión, cuyo valor se reporta en la Tabla 12. (AlMaadeed et al., 2012)

Gupta y colaboradores llevaron a cabo el análisis DSC del rPP con un rango de temperatura de 30-500°C para obtener la temperatura de degradación y la temperatura de transición vítrea, cuyos valores se muestran en la Tabla 12. (Gupta et al., 2014)

Tabla 12

Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Polipropileno (PP)

| Material | Punto de Fusión T _m (°C) | Temperatura de Degradación (°C) | Temperatura de Transición Vítrea T _g (°C) |
|----------|--|------------------------------------|--|
| vPP | 163.00 | 300.00 | -22.00 |
| rPP | 163.70 | 460.00 | -12.18 |

Nota. Adaptado de (Dos Santos et al., 2013); (Heikkinen et al., 2018); (Rezaei et al., 2009); (AlMaadeed et al., 2012); (Gupta et al., 2014)

3.4 Propiedades mecánicas y térmicas de poli (tereftalato de etileno) (PET)

3.4.1 Prueba de Tracción

Guessasma y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con poli (tereftalato de etileno) virgen (vPET), cuyo material fue procesado a través de impresión 3D mediante la técnica fabricación por filamento fundido. A partir de esta prueba obtuvieron el valor del módulo de Young y la elongación a la rotura (ver Tabla 13). (Guessasma et al., 2019)

Por su parte, Mosaddek y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción de vPET, procesado bajo las mismas condiciones anteriormente detalladas, para obtener el valor de la resistencia a la tracción mostrado en la Tabla 13. (Mosaddek et al., 2018)

De igual manera, Mosaddek y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con poli (tereftalato de etileno) reciclado (rPET), utilizando una impresora 3D por la técnica de fabricación por filamento fundido, logrando obtener los valores de la resistencia a la tracción, el módulo de Young y elongación a la rotura mostrados en la Tabla 13. (Mosaddek et al., 2018)

Tabla 13

Valores de Prueba de Tracción de Poli (Tereftalato de Etileno) (PET) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Young (MPa) | Resistencia a la Tracción (MPa) | Elongación a la Rotura (%) |
|----------|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| vPET | 491 | 38 | 8.8 |
| rPET | 738 | 33 | 3.2 |

Nota. Adaptado de (Guessasma et al., 2019); (Mosaddek et al., 2018)

3.4.2 Prueba de Flexión

Durgashyam y colaboradores llevaron a cabo la prueba de flexión de vPET, procesado bajo impresión 3D, para obtener los valores del módulo y resistencia a la flexión que se muestran en la Tabla 14. (Durgashyam et al., 2019). Por su parte Szabó

y Dogossy llevaron a cabo la prueba de flexión de rPET de donde obtuvieron los valores del módulo y resistencia a la flexión que se detalla en la Tabla 14 conjuntamente con las demás propiedades anteriormente reportadas por los demás autores. (Szabó & Dogossy, 2018)

Tabla 14

Valores de Prueba de Flexión de Poli (Tereftalato de Etileno) (PET) Impreso por la Técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

| Material | Módulo de Flexión (MPa) | Resistencia a la Flexión (MPa) |
|----------|-------------------------|--------------------------------|
| vPET | 3105.00 | 71.53 |
| rPET | 2760.00 | 67.14 |

Nota. Adaptado de (Durgashyam et al., 2019); (Szabó & Dogossy, 2018)

3.4.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para poli (tereftalato de etileno)

Zander y colaboradores llevaron a cabo la calorimetría diferencia de barrido de vPET con el fin de conocer la temperatura de transición vítrea, punto de fusión y temperatura de degradación. (Zander et al., 2018)

En el estudio del rPET, Zander y colaboradores analizaron el punto de fusión y la temperatura de transición vítrea por medio de un Analizador Mecánico Dinámico (DMA) que permitió la caracterización de las propiedades térmicas, cuyos valores se reportan en la Tabla 15 (Zander et al., 2019). Además, por medio de DSC identificaron la temperatura de degradación de dicho material un rango de temperatura de -50 a 300°C. (Zander et al., 2018) .

Tabla 15

Caracterización Obtenida por Calorimetría Diferencia de Barrido de Poli (Tereftalato de Etileno) (PET)

| Material | Punto de Fusión Tm (°C) | Temperatura de degradación (°C) | Temperatura de transición vítrea Tg (°C) |
|----------|-------------------------|---------------------------------|--|
| vPET | 250.70 | 400.00 | 76.10 |
| rPET | 252.30 | 500.00 | 72.50 |

Nota. Adaptado de (Zander et al., 2018); (Zander et al., 2019)

3.5 Análisis y comparación de propiedades mecánicas y térmicas de los materiales termoplásticos

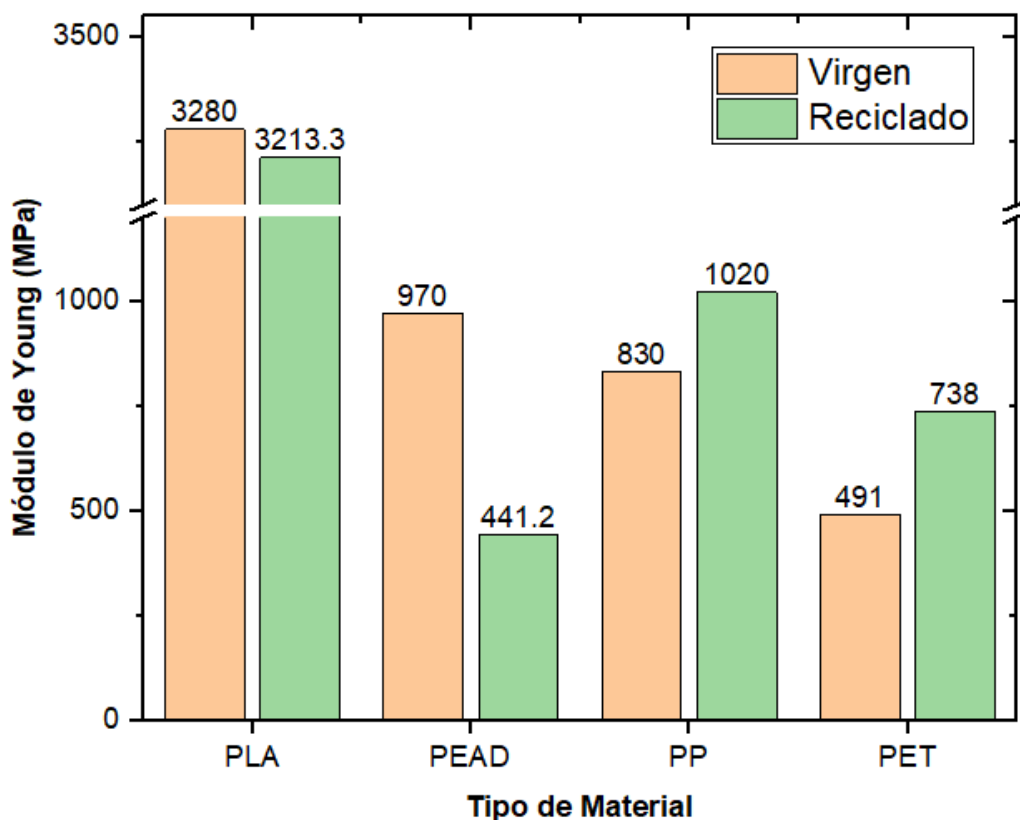
En esta sección que corresponde a la selección del material termoplástico con las mejores características para la impresión 3D, se ha realizado gráficas correspondientes para cada propiedad mecánica de los materiales vírgenes y reciclados donde se determina el porcentaje que disminución y aumento en relación a los materiales termoplásticos vírgenes.

3.5.1 Módulo de Young

En este apartado se analiza los valores del módulo de Young de los diferentes materiales termoplásticos en estado virgen y reciclado. En el Gráfico 4 se muestra los valores del Módulo de Young de cada uno de los materiales poliméricos con sus respectivos identificativos.

Gráfico 4

Módulo de Young de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos



En el Gráfico 4 se puede evidenciar que existe una disminución del módulo de Young respecto al material polimérico virgen, tal es el caso, que para el poli (ácido láctico) (rPLA) y el polietileno de alta densidad (rPEAD) el porcentaje disminuyó en un 2.03 % y 54.52 % respectivamente; esto debido a las diferentes extrusiones realizadas que provocan la modificación de la estructura de los polímeros cortando las cadenas poliméricas y ocasionando la degradación de las mismas. (Rogueda et al., 2011)

Por otro lado, el polipropileno (rPP) y el poli (tereftalato de etileno) (rPET) sus valores incrementan respecto al material polimérico virgen en un 22.89 % y 50.31 % respectivamente, esto debido a que el módulo de Young en función del número de los ciclos de reciclaje aumenta ligeramente debido a la mayor cristalinidad del rPP y rPET. Las estructuras cristalinas que se forman obstaculizan la rotación de los segmentos de cadena del polímero, por lo tanto, un material cristalino es significativamente más rígido que el plástico equivalente en su estado amorfo. (Aurrekoetxea et al., 2001)

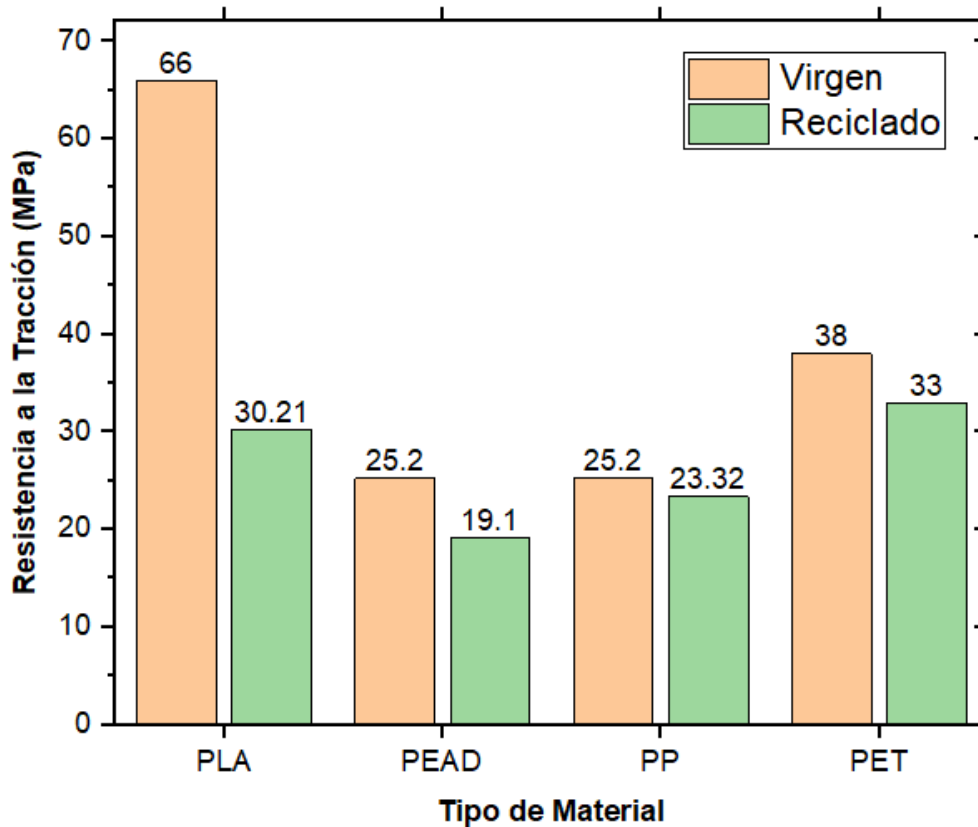
3.5.2 Resistencia a la Tracción

En este apartado consta los valores de la resistencia a la tracción de los diferentes materiales termoplásticos tanto en estado virgen como también reciclado. En el Gráfico 5 se muestra los valores de la resistencia a la tracción de cada uno de los materiales poliméricos con sus respectivos identificativos. A partir de este gráfico se puede observar que los valores de la resistencia a la tracción en todos los materiales poliméricos reciclados disminuyen respecto al material virgen, tal es el caso, que para el poli (ácido láctico) (rPLA) disminuyó en un 54.22 %; para el polietileno de alta densidad (rPEAD) disminuyó en un 24.21 %; de igual manera para el polipropileno (rPP) disminuyó en un 7.46 % y finalmente el poli (tereftalato de etileno) (rPET) disminuyó notablemente en un 13.16 %; esto podría atribuirse a diferentes factores entre ellos fenómenos potenciales de degradación del filamento, comportamiento de flujo y propiedades reológicas como la fuerza de haz corto que disminuye notablemente de

acuerdo al reprocesamiento del material polimérico; y podría evitarse adecuadamente mediante la optimización del proceso de impresión y reciclaje. (Lanzotti et al., 2019)

Gráfico 5

Resistencia a la Tracción de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos



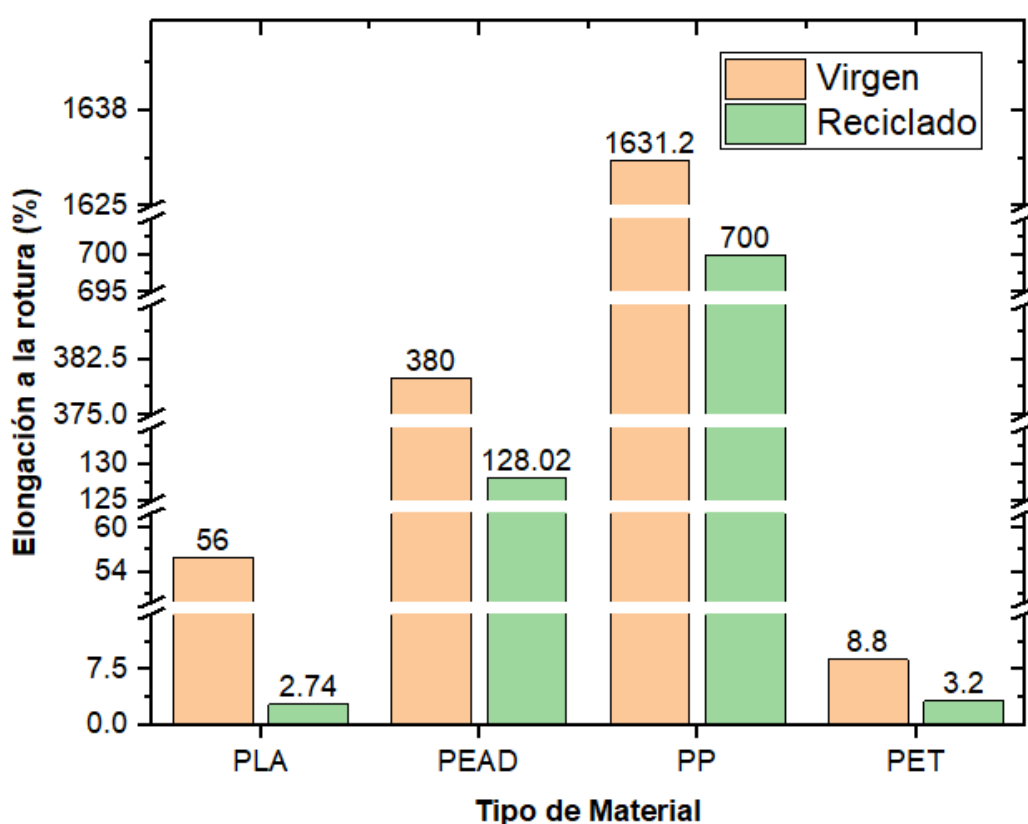
3.5.3 Elongación a la rotura

El estudio de la elongación a la rotura o porcentaje de deformación de los diferentes materiales termoplásticos en estado virgen y reciclado se muestran el Gráfico 6. Tal como se observa, los valores de elongación a la rotura en todos los materiales poliméricos reciclados disminuyeron considerablemente respecto al material polimérico virgen, así, para el poli (ácido láctico) (rPLA) disminuyó en un 95.11 %; para el polietileno de alta densidad (rPEAD) disminuyó en un 66.31 %; de igual manera para el polipropileno (rPP) disminuyó en un 57.09 % y finalmente el poli (tereftalato de etileno) (rPET) disminuyó notablemente en un 63.64 %. Esta disminución se puede atribuir al aumento de la cristalinidad y la reducción del peso molecular provocado por los ciclos

de reprocesamiento, los cuales ocasionan que haya menos cadenas integradas dentro de la estructura cristalina del polímero para sostener la tensión durante la tracción de carga provocando fallas a menor alargamiento. Además, las moléculas más cortas tienen menos entrelazamientos y menos vínculos para estirar. (Aurrekoetxea et al., 2001)

Gráfico 6

Elongación a la Rotura de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos



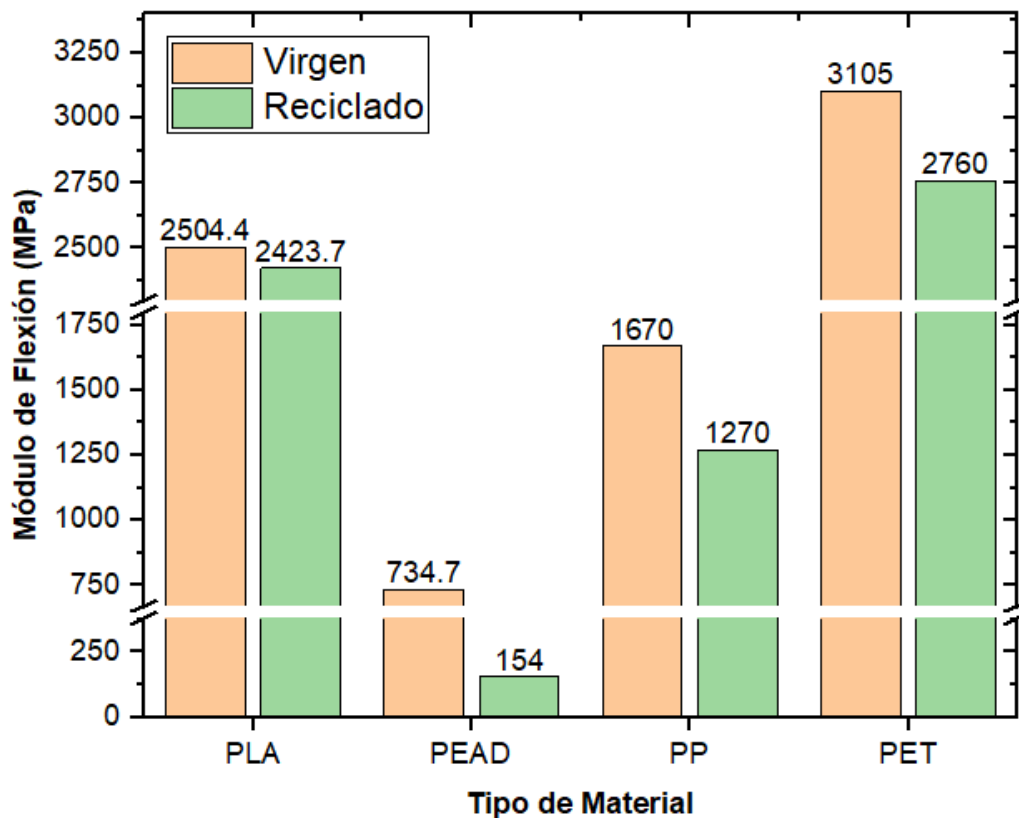
3.5.4 Módulo de Flexión

En el Gráfico 7 se observa los valores del módulo de flexión de los diferentes materiales termoplásticos tanto en estado virgen como reciclado, donde se puede apreciar que los valores del módulo de flexión en todos los materiales poliméricos reciclados disminuyeron considerablemente; así, el rPLA disminuyó un 3.22 %, el rPEAD un 79.04 %, el rPP un 23.95 % ; y, finalmente el rPET un 11.11 %; esto concuerda con lo reportado por diversos autores, los cuales mencionan que en los primeros 10 ciclos

de reprocesamiento las propiedades mecánicas no muestran cambios significativos; mientras que por encima de 10 ciclos estos resultados se desvían de los valores de los materiales poliméricos vírgenes, esto debido a cambios en la rigidez del polímero atribuida a una disminución del grado de cristalinidad. (Oblak et al., 2015)

Gráfico 7

Módulo de Flexión de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos



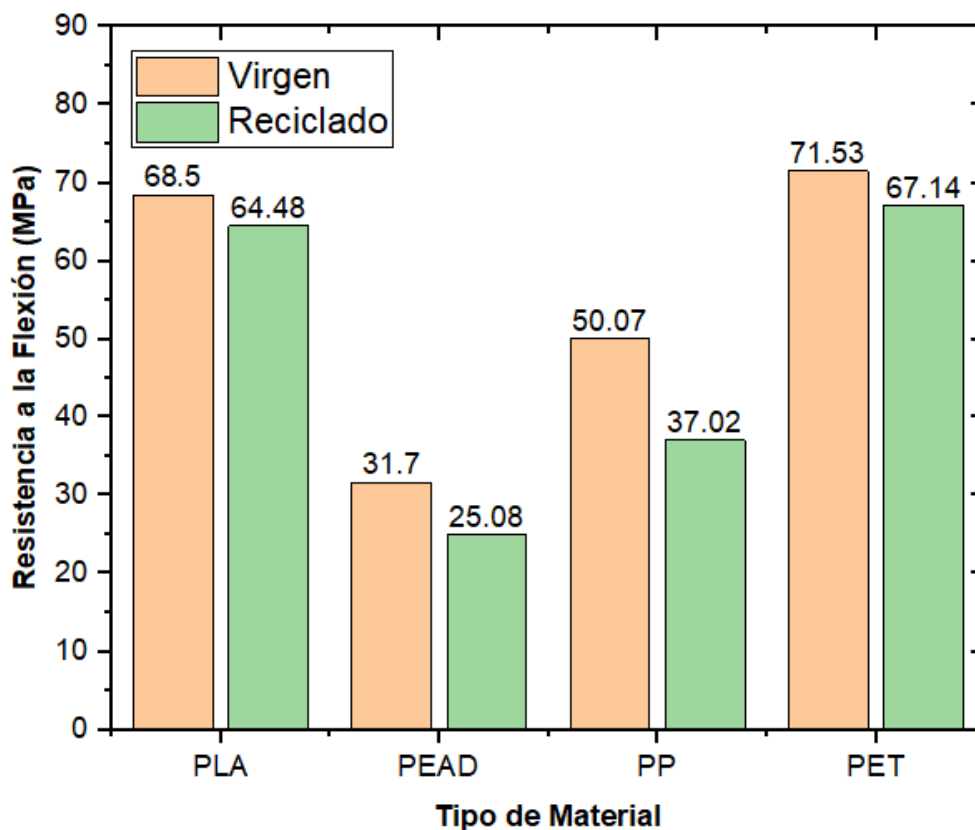
3.5.5 Resistencia a la Flexión

En el Gráfico 8 se observa los valores de la resistencia a la flexión de los diferentes materiales termoplásticos tanto en estado virgen como reciclado, donde se puede apreciar que los valores de la resistencia de flexión en todos los materiales poliméricos reciclados disminuyeron considerablemente concordando con el comportamiento presentado en la resistencia tracción; esto se debe posiblemente a que después del séptimo ciclo de procesamiento existe una la disminución del peso

molecular y de la cristalinidad ocasionando la propagación de grietas y provocando un reducción de dicha propiedad. (Pillin et al., 2008)

Gráfico 8

Resistencia a la Flexión de Distintos Tipos de Materiales Poliméricos



Finalmente, luego de haber realizado la comparación de polímeros vírgenes y reciclados, se pudo determinar que el polipropileno (rPP) y poli (tereftalato de etileno) (rPET), presentan las mejores características en las propiedades mecánicas y que se los puede utilizar aplicando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) para impresión 3D. Cabe destacar que al usar materiales reciclados se está generando un aporte significativo a la sociedad que consta de disminuir los niveles de contaminación y aportar al sector industrial sin la necesidad de importar resinas plásticas desde otros países.

3.6 Condiciones de procesamiento de los termoplásticos reciclables

En esta sección se recopiló la información necesaria respecto a pruebas térmicas con el fin de obtener las condiciones de procesamiento de los termoplásticos reciclables que ofrecieron las mejores propiedades, como son el polipropileno (rPP) y el poli (tereftalato de etileno) (rPET).

3.6.1 Condiciones del procesamiento del polipropileno reciclado (rPP)

La determinación de las condiciones de procesamiento se determinó mediante la recopilación de información bibliográfica de varios autores, tomando como referencia y punto de comparación al vPP donde se analiza el efecto de la temperatura tanto de extrusión como de impresión 3D en la propiedad mecánica de la resistencia a la tracción. Con este antecedente, se encontró que Harris y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con polipropileno virgen (vPP), las temperaturas de procesamiento del extrusor son las mostradas en la Tabla 16 conjuntamente con la temperatura de la boquilla usada en la impresora 3D por medio de la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF); adicionalmente se muestra el valor de la resistencia a la tracción obtenido bajo estas condiciones de procesamiento. (Harris et al., 2019)

Para el estudio del rPP, se tomó la recopilación de tres autores con el fin de obtener un amplio rango de temperaturas de procesamiento y analizar su efecto en la propiedad mecánica (resistencia mecánica). Por tanto, las condiciones utilizadas en la técnica de fabricación por filamento fundido a partir de material reciclado, temperaturas de procesamiento de extrusión y temperatura de la boquilla en la impresión 3D, se muestran en la Tabla 16; igualmente se indica el valor de la resistencia a la tracción obtenido bajo estas condiciones de procesamiento.

Tabla 16*Temperaturas de Procesamiento del Polipropileno reciclado (rPP)*

| Polímero | Autor | Extrusión | | Impresión 3D | Propiedad |
|----------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Temperatura Zona Inicial (°C) | Temperatura Zona Final (°C) | Temperatura de la Boquilla (°C) | Resistencia a la Tracción (MPa) |
| vPP | (Harris et al., 2019) | 180 | 225 | 235 | 25.20 |
| | Pickering et al., 2017 | 150 | 180 | 230 | 23.32 |
| rPP | Homkhiew et al., 2013 | 130 | 170 | 230 | 24.12 |
| | AlMaadeed et al., 2012 | 190 | 230 | 230 | 14.80 |

A partir de la Tabla 16 podemos observar que la propiedad mecánica disminuye con respecto al material polimérico virgen; probablemente debido a una mayor movilidad molecular provocando una disminución en la fase cristalina, afectando la resistencia a la tracción que se rige principalmente por esta fase (Alcock et al., 2007). Por tanto, de acuerdo a los valores de la resistencia a la tracción se puede notar que las condiciones de procesamiento tanto de la extrusión como de impresión 3D más idóneas son las reportadas por Homkhiew y colaboradores ya que disminuyen en un 4,29 % respecto al polímero virgen.

3.6.2 Condiciones del procesamiento del poli (tereftalato de etileno) reciclado (rPET)

La determinación de las condiciones de procesamiento parte de la recopilación de información bibliográfica de varios autores, tomando como referencia y punto de comparación al vPET donde se analiza el efecto de la temperatura tanto de extrusión como de impresión 3D en la propiedad mecánica de la resistencia a la tracción. Con

este antecedente, se encontró que Mosaddek y colaboradores llevaron a cabo la prueba de tracción con poli (tereftalato de etileno) virgen y reciclado (vPET, rPET), temperaturas de procesamiento del extrusor son mostradas en la Tabla 17 conjuntamente con la temperatura de la boquilla para la impresión 3D utilizando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF); adicionalmente se muestra el valor de la resistencia a la tracción obtenido bajo estas condiciones de procesamiento. (Mosaddek et al., 2018)

Para el estudio del rPET, se recopiló igualmente información bibliográfica bajo diferentes condiciones de procesamiento con el fin de analizar su efecto en la resistencia a la tracción. Así, Zander y colaboradores en los años 2018 y 2019 llevaron a cabo la prueba de tracción con polipropileno reciclado (rPP), cuyas temperaturas de procesamiento de extrusión se muestran en la Tabla 17 junto con la temperatura de la boquilla de la impresora 3D utilizando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF); igualmente se indica el valor de la resistencia a la tracción obtenido bajo estas condiciones de procesamiento. (Zander et al., 2018) & (Zander et al., 2019)

Tabla 17

Temperaturas de Procesamiento del Poli (tereftalato de etileno) reciclado (rPET)

| Polímero | Autor | Extrusión | | Impresión 3D | Propiedad |
|----------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | Temperatur a Zona Inicial (°C) | Temperatur a Zona Final (°C) | Temperatur a de la Boquilla (°C) | Resistencia a la Tracción (MPa) |
| vPET | Mosaddek et al., 2018 | 200 | 240 | 240 | 38.00 |
| | Mosaddek et al., 2018 | 200 | 246 | 246 | 33.00 |
| rPET | Zander et al., 2018 | 200 | 240 | 270 | 35.10 |
| | Zander et al., 2019 | 140 | 245 | 260 | 35.00 |

A partir de la Tabla 17 podemos observar que la propiedad mecánica disminuye con respecto al material polimérico virgen; probablemente debido a la disminución de la fase cristalina del polímero (Arencón, 2002). Por tanto, de acuerdo a los valores de la resistencia a la tracción se puede notar que las condiciones de procesamiento tanto de la extrusión como de impresión 3D más idóneas son las reportadas por Zander y colaboradores en el año 2018 ya que con estas condiciones se obtiene una menor disminución de la propiedad del 7.63 % en comparación con el polímero virgen. A pesar de este efecto; el polímero reciclado constituye una opción de trabajo para impresión 3D.

Conclusiones

Al terminar el desarrollo del presente Trabajo de Titulación se concluye lo siguiente:

La impresión 3D constituye una herramienta de alta aplicación bajo la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF), y en la actualidad está en constante crecimiento en diversas áreas del conocimiento volviéndose en un futuro una tecnología mucho más sofisticada en relación a las tecnologías tradicionales.

La técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) a pesar de que su limitante sea utilizar necesariamente filamento continuo y no poder usar pellets directamente sin pasar por un extrusor, se cree que es conveniente utilizarla debido a que es una técnica nueva, de código abierto; esto es, que no requiere licencia para ser usada y que cualquier persona tiene acceso a mejorarla; y, es la razón por la que está aumentando su utilidad y a su vez expandiéndose globalmente.

Los termoplásticos reciclables como el polipropileno (rPP) y el poli (tereftalato de etileno) (rPET) presentaron menor porcentaje de disminución de las propiedades mecánicas de tracción y flexión en referencia al polímero virgen y es la razón por la que fueron elegidos como los más adecuados para ser usados en la impresión 3D.

Para obtener buenas propiedades mecánicas del polipropileno reciclado (rPP) el material debería ser procesado en un extrusor a una temperatura en la zona inicial de 130°C y en la zona final a 170°C, esto para la obtención del filamento continuo y posteriormente, para realizar el proceso de impresión 3D la boquilla debe estar a 230°C utilizando la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF).

Para realizar el procesamiento de poli (tereftalato de etileno) reciclado (rPET) la temperatura del extrusor en la zona inicial debería ser de 200°C y en la zona final de 240°C, esto para la obtención del filamento continuo; y posteriormente, para realizar el proceso de impresión 3D mediante la técnica FFF la temperatura de la boquilla debe estar a 270°C.

Recomendaciones

Al terminar el desarrollo del presente Trabajo de Titulación se recomienda lo siguiente:

Realizar un levantamiento de información sobre el funcionamiento de la extrusión, la impresión 3D y la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) para evitar errores de manejo de máquinas en estudios prácticos.

Para una investigación práctica se recomienda hacer un estudio previo del material de partida para identificar la propiedades mecánicas y térmicas con el fin de obtener las condiciones de procesamiento.

De todos los termoplásticos reciclables se recomienda usar el polipropileno (rPP) y el poli (tereftalato de etileno) (rPET) debido a que sus propiedades mecánicas no se ven afectadas por el reprocesamiento.

De acuerdo a lo investigado bibliográficamente, se recomienda usar una cama caliente en la impresión 3D para el polímero PET ya que esto ayuda a que el material se adhiera a la base de impresora obteniendo una mejor formación del producto.

De acuerdo a lo investigado bibliográficamente, como una opción de procesamiento adicional para el rPET se recomienda trabajar en el extrusor a una temperatura en la zona inicial de 140°C y zona final de 245°C; y para la impresión 3D una temperatura de boquilla de 260°C.

Referencias

- Agwuncha, S. C., Ibrahim, I. D., & Sadiku, E. R. (2017). Improving the thermal and flame resistance properties of polyolefins. In *Polyolefin Fibres: Structure, Properties and Industrial Applications: Second Edition*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101132-4.00014-X>
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Alcock, B., Cabrera, N. O., Barkoula, N. M., Reynolds, C. T., Govaert, L. E., & Peijs, T. (2007). The effect of temperature and strain rate on the mechanical properties of highly oriented polypropylene tapes and all-polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 67(10), 2061–2070. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.11.012>
- AlMaadeed, M. A., Kahraman, R., Khanam, P. N., & Madi, N. (2012). Date palm wood flour / glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties. *JOURNAL OF MATERIALS&DESIGN*, 42, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.055>
- Arencón, D. (2002). *The Influence of Injection-Molding Variables and Nucleating Additives on Thermal and Mechanical Properties of Short Glass Fiber/PET Composites*. 15(July 2002), 317–336. <https://doi.org/10.1106/089270502021456>
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5), 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- Aurrekoetxea, J., Sarrionandia, M. A., Urrutibeascoa, I., & Maspoch, M. L. (2001). Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic

polypropylene. *Journal of Materials Science*, 36(11), 2607–2613.
<https://doi.org/10.1023/A:1017983907260>

Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>

Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2015). Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1–4), 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>

Billmeyer, F. (1975). *Ciencia de los Polímeros* (E. Reverté (ed.); Segunda ed).

Brandalise, R. N., Zeni, M., Martins, J. D. N., & Forte, M. M. C. (2009). Morphology, mechanical and dynamic mechanical properties of recycled high density polyethylene and poly(vinyl alcohol) blends. *Polymer Bulletin*, 62(1), 33–43. <https://doi.org/10.1007/s00289-008-0989-4>

Camuña, J. F. R. (2013). *Acondicionado de materiales termoplásticos para su transformación* (I. Editorial (ed.); Primera Ed).

Castells, X. E., & Jurado, L. (2012). *Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración*. Díaz de Santos.

Chong, S., Pan, G. T., Khalid, M., Yang, T. C. K., Hung, S. T., & Huang, C. M. (2016). Physical Characterization and Pre-assessment of Recycled High-Density Polyethylene as 3D Printing Material. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(2), 136–145. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0793-4>

Cruz, F., Lanza, S., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). Polymer recycling and additive manufacturing in an open source context: Optimization of processes and methods. *Proceedings - 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2015*, 1591–1600.

- Cruz, F. S., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing*, 17, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.013>
- Dehoff, R. R., & Babu, S. S. (2010). Characterization of interfacial microstructures in 3003 aluminum alloy blocks fabricated by ultrasonic additive manufacturing. *Characterization of Interfacial Microstructures in 3003 Aluminum Alloy Blocks Fabricated by Ultrasonic Additive Manufacturing*, 58(13), 4305–4315. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.03.006>
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Dos Santos, W. N., De Sousa, J. A., & Gregorio, R. (2013). Thermal conductivity behaviour of polymers around glass transition and crystalline melting temperatures. *Polymer Testing*, 32(5), 987–994. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.05.007>
- Durán, D. R. (2019). *Circular economy through plastic recycling process into 3D printed products: A frugal solution for schools. October.* https://discovery.upc.edu/iii/encore/record/C__Rb1525434__S3d_printing_innovation__Orightresult__U__X1?lang=cat
- Durgashyam, K., Indra Reddy, M., Balakrishna, A., & Satyanarayana, K. (2019). Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2052–2059. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.082>
- Frone, A. N., Berlioz, S., Chailan, J. F., & Panaitescu, D. M. (2013). Morphology and thermal properties of PLA-cellulose nanofibers composites. *Carbohydrate Polymers*, 91(1), 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.054>

- Gasser, A., Backes, G., Kelbassa, I., Weisheit, A., & Wissenbach, K. (2010). Laser Additive Manufacturing: Laser Metal Deposition (LMD) and Selective Laser Melting (SLM) in Turbo-Engine Applications. *Laser Technik Journal*, 7(2), 58–63. <https://doi.org/10.1002/latj.201090029>
- Ge, Z., Huang, D., Sun, R., & Gao, Z. (2014). Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate. *Construction and Building Materials*, 73, 682–687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.005>
- Gibson, M. A., Mykulowycz, N. M., Shim, J., Fontana, R., Schmitt, P., Roberts, A., Ketkaew, J., Shao, L., Chen, W., Bordeenithikasem, P., Myerberg, J. S., Fulop, R., Verminski, M. D., Sachs, E. M., Chiang, Y. M., Schuh, C. A., John Hart, A., & Schroers, J. (2018). 3D printing metals like thermoplastics: Fused filament fabrication of metallic glasses. *Materials Today*, 21(7), 697–702. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.07.001>
- Go, J., Schiffres, S. N., Stevens, A. G., & Hart, A. J. (2017). Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design. *Additive Manufacturing*, 16(2010), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.007>
- Gohil, R. M. (2009). Properties and Strain Hardening Character of Polyethylene Terephthalate Containing Isosorbide Ramesh. *Society*. <https://doi.org/10.1002/pen.20840>
- Gomez, G. G., Jerez-mesa, R., & Travieso-, J. A. (2017). Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.072>
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna* (P. R. Vazques (ed.); Tercera Ed). McGraw-Hill Interamericana.

- Guessasma, S., Belhabib, S., & Nouri, H. (2019). Printability and tensile performance of 3D printed polyethylene terephthalate glycol using fused deposition modelling. *Polymers*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/polym11071220>
- Gupta, A. K., Biswal, M., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2014). *Mechanical and Thermal Degradation Behavior of Sisal Fiber (SF) Reinforced Recycled Polypropylene (RPP) Composites*. 15(5), 994–1003. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-0994-1>
- Harris, M., Potgieter, J., Archer, R., & Arif, K. M. (2019). Effect of material and process specific factors on the strength of printed parts in fused filament fabrication: A review of recent developments. *Materials*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/ma12101664>
- Heikkinen, I. T. S., Kauppinen, C., Liu, Z., Asikainen, S. M., Spoljaric, S., Seppälä, J. V., Savin, H., & Pearce, J. M. (2018). Chemical compatibility of fused filament fabrication-based 3-D printed components with solutions commonly used in semiconductor wet processing. *Additive Manufacturing*, 23(May), 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.015>
- Homkhiew, C., Ratanawilai, T., & Thongruang, W. (2013). *Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: Effects of composition on mechanical properties*. <https://doi.org/10.1177/0892705712475019>
- Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G. (2017). Microstructure and thermal properties of cetyl alcohol/high density polyethylene composite phase change materials with carbon fiber as shape-stabilized thermal storage materials. *Applied Energy*, 200, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.074>
- Hung, K. C., Tseng, C. S., & Hsu, S. H. (2014). Synthesis and 3D Printing of biodegradable polyurethane elastomer by a water-based process for cartilage tissue engineering applications. *Advanced Healthcare Materials*, 3(10), 1578–1587. <https://doi.org/10.1002/adhm.201400018>

- Hunt, E. J., Zhang, C., Anzalone, N., & Pearce, J. M. (2015). Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.004>
- Jammalamadaka, U., & Tappa, K. (2018). Recent advances in biomaterials for 3D printing and tissue engineering. *Journal of Functional Biomaterials*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/jfb9010022>
- Jansson, A., Mo, K., & Gevert, T. (2003). *Degradation of post-consumer polypropylene materials exposed to simulated recycling — mechanical properties*. 82, 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00160-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00160-5)
- Kanzenbach, L., Stockmann, M., & Ihlemann, J. (2016). Extension of the Testing Machine Control for High-precision Uniaxial Tension Measurements. *Materials Today: Proceedings*, 3(4), 993–996. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.03.035>
- Khaliq, M. H., Gomes, R., Fernandes, C., Nóbrega, J., Carneiro, O. S., & Ferrás, L. L. (2017). On the use of high viscosity polymers in the fused filament fabrication process. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 727–735. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2016-0027>
- Khudiakova, A., Arbeiter, F., Spoerk, M., Wolfahrt, M., Godec, D., & Pinter, G. (2019). Inter-layer bonding characterisation between materials with different degrees of stiffness processed by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 28(May), 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.006>
- Kreiger, M. A., Mulder, M. L., Glover, A. G., & Pearce, J. M. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. *Journal of Cleaner Production*, 70, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>
- Kumar, S., Panda, A. K., & Singh, R. K. (2011). A review on tertiary recycling of high-

- density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 893–910. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.005>
- Lanzotti, A., Martorelli, M., Maietta, S., Gerbino, S., Penta, F., & Gloria, A. (2019). A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP*, 79, 143–146. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.030>
- Lee, C. Y., & Liu, C. Y. (2019). The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 25, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.012>
- Liang, J. Z., & Yang, Q. Q. (2007). Mechanical, thermal, and flow properties of HDPE-mica composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20(2), 225–236. <https://doi.org/10.1177/08927057074592>
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*, 117(15), 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- Lu, N., & Oza, S. (2013). A comparative study of the mechanical properties of hemp fiber with virgin and recycled high density polyethylene matrix. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1651–1656. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.076>
- Madrigal, J. F. G. (2011). *Manual de plásticos para diseñadores* (Primera Ed).
- McIlroy, C., & Olmsted, P. D. (2017). Deformation of an amorphous polymer during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing. *Journal of Rheology*, 61(2), 379–397. <https://doi.org/10.1122/1.4976839>
- Medellín, J. (2009). Punto de fusión. *Reponame: Repositorio Institucional de La Universidad Nacional Abierta y a Distancia*.
- Mexpolímeros. (2010). *Estabilidad térmica - Polímeros termoplásticos, elastómeros y*

aditivos. Mexpolímeros.

Mogollón, M. K. (2018). *Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso*.

Morales, S. P., Minguella-Canela, J., Lluma-Fuentes, J., Travieso-Rodriguez, J. A., & García-Granada, A. A. (2018). Multi Jet Fusion PA12 manufacturing parameters for watertightness, strength and tolerances. *Materials*, 11(8), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma11081472>

Morillas, A. V., Ma, R., & Valdemar, E. (2016). *El reciclaje de los plásticos*. 1–16. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4440.1527>

Mosaddek, A., Kommula, H. K. R., & Gonzalez, F. (2018). Design and Testing of a Recycled 3D Printed and Foldable Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing. *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2018*, 1207–1216. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453284>

Mosquera, L., Arias, S., Jimenez, D., Lopez, D., & Osorio, A. (2015). Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos. *Revista Vector*, 9(2014), 24. http://vector.ucaldas.edu.co/downloads/Vector9_4.pdf

Nwogu, C. N., Uche, R., Igbokwe, J. O., & Okoronkwo, C. A. (2019). Characterization of Recycled Polyethylene Terephthalate Powder for 3D Printing Feedstock. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 4(2). <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v4i2.396>

Oblak, P., Gonzalez-Gutierrez, J., Zupančič, B., Aulova, A., & Emri, I. (2015). Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 114, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.012>

Padilla, S., & Pilataxi, C. (2019). *Módulo de Información Ambiental en Hogares - ESPND*,

2018. INEC.

- Pakkanen, J., Manfredi, D., Minetola, P., & Iuliano, L. (2017). About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing. *Sustainable Design and Manufacturing 2017, Smart Innovation, Systems and Technologies 68*, 3(April), 11. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57078-5>
- Pandian, A., & Belavek, C. (2017). A review of recent trends and challenges in 3D printing. *Proceedings of the 2016 ASEE North Central Section Conference*, 1–17.
- Patil, B., Bharath Kumar, B. R., Bontha, S., Balla, V. K., Powar, S., Hemanth Kumar, V., Suresha, S. N., & Doddamani, M. (2019). Eco-friendly lightweight filament synthesis and mechanical characterization of additively manufactured closed cell foams. *Composites Science and Technology*, 183(April), 107816. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107816>
- Pavlo, S., Fabio, C., Hakim, B., & Mauricio, C. (2018). 3D-Printing Based Distributed Plastic Recycling: A Conceptual Model for Closed-Loop Supply Chain Design. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2018 - Proceedings*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436296>
- Pickering, K. L., Stoof, D. B., & School. (2017). *Sustainable Composite Fused Deposition Modelling Filament Using Post-Consumer Recycled Polypropylene*. <https://doi.org/10.3390/jcs1020017>
- Pillin, I., Montrelay, N., Bourmaud, A., & Grohens, Y. (2008). Effect of thermo-mechanical cycles on the physico-chemical properties of poly(lactic acid). *Polymer Degradation and Stability*, 93(2), 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.12.005>
- Rajpurohit, S. R., & Dave, H. K. (2018). Flexural strength of fused filament fabricated (FFF) PLA parts on an open-source 3D printer. *Advances in Manufacturing*, 6(4),

430–441. <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0237-6>

Rasal, R. M., Janorkar, A. V., & Hirt, D. E. (2010). Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 35(3), 338–356. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003>

Rezaei, F., Yunus, R., & Ibrahim, N. A. (2009). Effect of fiber length on thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Materials and Design*, 30(2), 260–263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.005>

Rogueda, C. B., Bahlouli, N., Pessey, D., & Rémond, Y. (2011). Mechanical behavior of recycled polypropylene composites under tensile, bending, and creep loading: Experimental and modeling. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 133(3), 1–8. <https://doi.org/10.1115/1.4004051>

Rubiano Fernández, L., Silva, P., Antonio, M., Barrera Valero, O., Orozco, W., Quesada, F., Diaz, M., & Gaviria, L. (2013). Manejo de los materiales plásticos reciclados y mejoramiento de sus propiedades. *INGE@ UAN-Tendencias En La Ingeniería*, 1(2), 52–60.

Saeidlou, S., Huneault, M. A., Li, H., & Park, C. B. (2012). Poly(lactic acid) crystallization. *Progress in Polymer Science*, 37(12), 1657–1677. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.07.005>

Satapathy, S., & Kothapalli, R. V. S. (2015). Influence of fly ash cenospheres on performance of coir fiber-reinforced recycled high-density polyethylene biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(28), 1–14. <https://doi.org/10.1002/app.42237>

Sax, L. (2010). *Polyethylene Terephthalate May Yield Endocrine Disruptors*. 118(4), 445–449. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901253>

Schirmeister, C. G., Hees, T., Licht, E. H., & Mülhaupt, R. (2019). 3D printing of high

- density polyethylene by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 28(April), 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.003>
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835–1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- Singh, D., Babbar, A., Jain, V., Gupta, D., Saxena, S., & Dwibedi, V. (2019). Synthesis, characterization, and bioactivity investigation of biomimetic biodegradable PLA scaffold fabricated by fused filament fabrication process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1625-y>
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409–422. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>
- Smith, W., & Jashemi, H. (2006). *Fundamentos de Ciencia e Ingeniería de Materiales* (Cuarta Edi). Mc Graw - Hill.
- Sodagar, A., Bahador, A., Khalil, S., Saffar Shahroudi, A., & Zaman Kassaei, M. (2013). The effect of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles on flexural strength of poly (methyl methacrylate) acrylic resins. *Journal of Prosthodontic Research*, 57(1), 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.jprior.2012.05.001>
- Spavento, E. M., Keil, G. D., & Monteoliva, S. (2008). *Propiedades Mecánicas de la Madera*. Universidad Nacional de la Plata.
- Spoerk, M., Savandaiah, C., Arbeiter, F., Traxler, G., Cardon, L., Holzer, C., & Sapkota, J. (2018). Anisotropic properties of oriented short carbon fibre filled polypropylene parts fabricated by extrusion-based additive manufacturing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 95–104.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.06.018>

Sulyman, M., Haponiuk, J., & Formela, K. (2016). Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2), 100–108.
<https://doi.org/10.7763/ijesd.2016.v7.749>

Szabó, V. A., & Dogossy, G. (2018). Structure and properties of closed-cell foam prepared from rPET. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 426(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/426/1/012043>

Tian, H., Tang, Z., Zhuang, X., Chen, X., & Jing, X. (2012). Biodegradable synthetic polymers: Preparation, functionalization and biomedical application. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 37(2), 237–280.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.004>

Tumbleston, J. R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A. R., Kai, K., Robert, C., Rolland, J. P., Ermoshkin, A., Samulski, E. T., & Desimone, J. M. (2015). *Producción continua de interfaz líquida de objetos 3D*. 1–7.
<https://doi.org/10.1126/science.aaa2397>

Ulery, B. D., Nair, L. S., & Laurencin, C. T. (2011). Biomedical applications of biodegradable polymers. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 49(12), 832–864. <https://doi.org/10.1002/polb.22259>

Virginie, M. (2011). *Los caminos del reciclaje* (S. L. Service (ed.); Primera Ed). Proyecto natur.

Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2(2), 307–344.
<https://doi.org/10.3390/ma2020307>

Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–

458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>

Wu, H., Sulkis, M., Driver, J., Saade-Castillo, A., Thompson, A., & Koo, J. H. (2018). Multi-functional ULTEM™1010 composite filaments for additive manufacturing using Fused Filament Fabrication (FFF). *Additive Manufacturing*, *24*, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.014>

Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. *Engineering*. [https://doi.org/S2095-8099\(17\)30675-6](https://doi.org/S2095-8099(17)30675-6)

Yap, Y. L., & Yeong, W. Y. (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review: This paper provides an insight into the future of 3D printing industries for fashion and jewellery products. *Virtual and Physical Prototyping*, *9*(3), 195–201. <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>

Zander, N. E., Gillan, M., Burckhard, Z., & Gardea, F. (2019). Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials. *Additive Manufacturing*, *25*, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.009>

Zander, N. E., Gillan, M., & Lambeth, R. H. (2018). Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material. *Additive Manufacturing*, *21*(March), 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.007>

Zenkiewicz, M., Richert, J., Rytlewski, P., Moraczewski, K., Stepczyńska, M., & Karasiewicz, T. (2009). Characterisation of multi-extruded poly(lactic acid). *Polymer Testing*, *28*(4), 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2009.01.012>

Zhao, P., Rao, C., Gu, F., Sharmin, N., & Fu, J. (2018). Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, *197*, 1046–1055. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.275>

Zhu, W., Ma, X., Gou, M., Mei, D., Zhang, K., & Chen, S. (2016). 3D printing of functional biomaterials for tissue engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, *40*, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.03.014>