

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



Estudio de la viabilidad del reformado de materia prima para procesos de manufactura aditiva por impresión 3D

Tesis para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

Presenta

José Francisco Arámbula Zazueta

DIRECTOR

Dr. Mario Alberto Curiel Álvarez

CO-DIRECTORA

Dra. Patricia Mariela Dominguez Osuna

Mexicali, Baja California, enero de 2026.

Índice

Resumen	5
Abstract.....	5
CAPÍTULO 1.....	6
1.1 Introducción	6
1.2 Justificación	8
1.3 Objetivos de la Investigación.....	9
1.3.1 General.....	9
1.3.2 Específicos	9
1.4 Hipótesis	9
CAPÍTULO 2.....	10
2.1 Antecedentes y marco teórico	10
2.1.1 Orígenes de la impresión 3D	10
2.1.2 Principio de funcionamiento maquinaria de deposición de material fundido (FDM). 10	
2.1.3 Técnicas de caracterización de materiales para impresión 3D	12
2.1.3.1 Microscopía SEM.....	12
2.1.3.2 Análisis termogravimétrico TGA.....	12
2.1.3.3 Tensión superficial por ángulo de contacto con el agua WCA.....	13
2.1.4 Fabricación de filamento 3D	13
2.1.4.1 Pasos para la fabricación del filamento PLA y ABS.....	14
2.1.5 Crecimiento mercado global de impresión 3D.....	15
2.1.6 Contaminación de la impresión 3D	17
2.1.7 Materiales para impresión 3D (Polímeros).....	18
2.1.8 Propiedades específicas de polímeros con mayor presencia en la manufactura aditiva.....	23
2.1.8.1 PLA.....	24
2.1.8.2 PETG	26
2.1.8.3 ABS.....	27
2.1.8.4 Nylon 66.....	28
2.1.9 Degradación térmica de polímeros	30
2.1.10 Reprocesamiento mecánico de termoplásticos.....	32
CAPÍTULO 3.....	34
3.1 Metodología	34

3.1.1 Determinar el cambio en las propiedades del material de desperdicio mediante estudio físico/químico.	34
3.1.1.1 Microscopía SEM	35
3.1.1.2 Análisis termogravimétrico (TGA).....	37
3.1.1.3 Medición por ángulo de contacto con el agua (WCA).....	38
3.1.2 Determinar viabilidad de tratamiento al material para restaurar composición original.	39
3.1.3 Propuesta de procesadora de material.	41
3.1.4 Propuesta de extrusora de filamento.	44
CAPÍTULO 4.....	46
4.1 Resultados y Discusiones	46
4.1.2 Pruebas Termogravimétricas (TGA)	48
4.1.2.1 Filamento sin uso	48
4.1.2.2 Filamento 1 ciclo	50
4.1.2.3 Filamento Reformado.....	51
4.1.3 Prueba de tensión superficial (WCA).....	52
4.1.4 Triturado fase 1	54
4.1.5 Tamizado.....	56
4.1.6 Extruido	57
4.1.6.1 Extruido 200 C	58
4.1.6.2 Problemas de flujo	59
4.1.6.3 Ajuste temperatura final fase 1 150 grados centígrados.....	61
4.1.6.4 Primer filamento reformado.....	62
4.1.6.5 Variaciones en diámetro.....	64
4.1.7 Triturado fase 2	65
4.1.7.1 Trituradora industrial	65
4.1.7.2 Limpieza.....	66
4.1.7.3 Proceso de triturado	67
4.1.7.4 Medición de tamaño de pellet o grano de molienda	71
4.1.7.5 Segundo filamento reformado	77
4.1.7.6 Maquina de fuerza de tensión	81
4.1.7.7 Extruido controlado	83
4.1.7.8 Impresión 3D material reformado	85
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	87
REFERENCIAS	89

Índice de figuras

Fig. 1. Impresora 3D en funcionamiento.....	12
Fig. 2. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo.....	14
Fig. 3. Pellets de polímero plástico.....	15
Fig. 4. Gráfica de crecimiento de Mercado de impresión 3D.....	17
Fig. 5. Tabla propiedades materiales termoplásticos.....	20
Fig. 6. Tabla propiedades materiales de Polyjet.....	22
Fig. 7. Tabla de propiedades de materiales plásticos.....	29
Fig. 8. Cambio de color en muestras de PLA obtenidas en el proceso de inyección.....	31
Fig. 9. Tabla del cambio de color durante el reprocesamiento de PLA en inyección.....	32
Fig. 11. Plano de diseño de cuchilla de trituradora de plástico.....	42
Fig. 12. Plano de diseño de configuración de cuchillas de trituradora de plástico.....	42
Fig. 13. Plano de diseño de trituradora de plástico.....	43
Fig. 14. Antes de extrusión.....	46
Fig. 15. Después de la extrusión.....	47
Fig. 16 y 17. Placa de material para pruebas de tensión superficial.....	52
Fig. 18 WCA PLA reformado.....	53
Fig. 19. Ángulo de contacto.....	53
Fig. 20. Material triturado.....	55
Fig. 21. Material sobre malla como filtro.....	56
Fig. 22. Material en tolva de alimentación.....	57
Fig. 23. Máquina de extrusión.....	58
Fig. 24. Aglomerado de material extruido.....	60
Fig. 25. Extrusora temperatura fijada 150.....	61
Fig. 26. Rollo de filamento reformado.....	62
Figuras 27 y 28. Valores máximos y mínimos de filamento reformado.....	64
Figura 29. Máquina trituradora y Figura 30. Navajas de la misma trituradora.....	65
Fig. 31. Malla filtrante de pellets.....	66
Figura 32 y 33. Navajas antes y después de la limpieza.....	66
Fig. 34 y 35. Impresiones 3D con errores y sin utilidad.....	67
Fig 36. Pesaje en báscula de material a triturar.....	68
Fig. 37 y 38. Material introducido a la máquina y molienda obtenida.....	69
Fig. 39. Material resultante de la molienda.....	70
Figura 40. Peso molienda 1 en volumen de 5 ml.....	72
Fig. 41. Peso molienda 2 en volumen de 5 ml.....	74

Fig. 42. Peso molienda 3 en volumen de 5 ml.....	76
Fig. 43. Cambios temperatura extrusión graduales.	77
Fig. 44. Material triturado de donación.	78
Fig. 45 y 46. Filamento con secciones de cambio de color y forma.....	79
Fig. 47. Polímero contaminante en molienda.	80
Fig. 48. Material extruido perteneciente a la investigación.	81
Fig. 49. Diseño electrónico.....	82
Fig. 50. Diseño CAD máquina de elongación del filamento.	82
Fig 51. Tamaño de filamento a elongación de velocidad rápida.	83
Fig 52 y 53. Material a menor velocidad de elongación.....	84
Fig. 54. Material reformado siendo reutilizado en manufactura aditiva.	85
Fig. 55. Producto de la impresión 3D de filamento reformado.	86

Resumen

Esta investigación aborda la problemática presentando antecedentes del impacto que los materiales plásticos tienen en el ambiente, teniendo como objetivo del mismo, conocer la viabilidad de los procesos de reformado para materiales de impresión 3D específicamente PLA y reducir a su vez, los desperdicios que van directamente a la basura y, por ende, la contaminación que estos pueden dejar. Se genera la hipótesis que el material plástico pierde propiedades al cumplir su ciclo de vida al procesarlos por una etapa de extrusión y es posible reutilizarlo al tratar de reformar dicho material de nuevo. Dando uso de técnicas de espectroscopia como el SEM y análisis termogravimétricos se refuta la pérdida de propiedades que se consideraban y confirmando sus posibilidades de reformado Posterior al estudio, se proponen diseños de dos posibles máquinas o sistemas para regresar el material a su forma de filamento, quedando en diseño por altos costos de manufactura, dando uso de maquinaria que se encuentra comercialmente para finalmente obtener filamento nuevo de los desperdicios y a su vez impresiones 3D con este mismo.

Abstract

This research addresses the problem by presenting a background of the impact that plastic materials have on the environment, with the objective of knowing the feasibility of reforming processes for 3D printing materials specifically PLA and reducing in turn the waste that goes directly into the trash and therefore the pollution it can leave behind. The hypothesis is that plastic material loses properties when it meets its life cycle when processed by an extrusion stage and can be reused when trying to reform this material again. Using spectroscopy techniques such as SEM and thermogravimetric analysis refutes the loss of properties that were considered and confirms their potential for reforming are proposed designs of two possible machines or systems to return the material to its filament shape, remaining in design for high manufacturing costs, using machinery found commercially to finally obtain new filament from the waste and in turn 3D prints with it.

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

La manufactura aditiva se encuentra en una constante innovación en procesos con la intención de mejorar el desarrollo de proyectos y prototipos, así como, buscar la reducción de materiales desperdiciados durante la construcción de una herramienta o máquina. Inicialmente, la manufactura aditiva surgió con base en esta última idea, partiendo de la reducción de desperdicio que los maquinados tradicionales generaban, se logró obtener una menor cantidad de desperdicio de material, en comparación con maquinado por desbaste. Sin embargo, surge una nueva problemática a resolver, en la que las complejidades de las piezas juegan el papel principal como responsable de errores en el proceso de creación generando así, desperdicios considerables de material que pasa a ser inutilizable. Si bien, es posible desarrollar diseños para un uso en específico y de impresión sencilla, los desperdicios comúnmente superan el 100% de lo esperado, esto debido principalmente a que estos procesos exigen una cantidad considerable de tiempo, lo que lleva a horas de operación en horarios no accesibles para mantener la supervisión del proceso en su totalidad.

Actualmente es común escuchar del reciclaje de plásticos como PET y ABS, provenientes de envases y tapas de botellas, para transformarlo en material de impresión, pero son escasos los procesos en los que desechos de soportes de impresión y de errores después de la manufactura aditiva, se puedan procesar nuevamente. No solo hablando de derretir y procesar, sino identificar qué propiedades pierde el material, para que pueda ser útil nuevamente de manera similar a como lo haría uno nuevo destinado a un propósito. Por lo anterior expuesto, esto es algo que resulta necesario investigar y estudiar a mayor detalle. Actualmente se considera que reciclar y reutilizar de manera óptima el material tipo plásticos podría llevar a reducir el impacto ambiental generado por todos estos residuos.

Anualmente se producen millones de toneladas de plásticos en el mundo. En México, el consumo anual de plásticos por habitante en 2005 se estimaba en 49 kilogramos. Del total consumido, más de un millón de toneladas por año se convierten

en desecho. La degradación de los plásticos sintéticos es muy lenta. Como ejemplo, la descomposición de productos orgánicos tarda 3 ó 4 semanas, la de telas de algodón 5 meses, mientras que la del plástico puede tardar 500 años (Segura, D., Noguez, R., & Espín, G., 2007).

Tomando en consideración el impacto ambiental que los plásticos ya tienen en México, es posible reducir en gran parte la huella ecológica que la impresión 3D llega a causar. Iniciando con proyectos de reformado o reciclado mediante centros de acopio, incluso, se podría considerar la compra de ese material de impresión que ya es considerado como basura.

La presente investigación está orientada al análisis del comportamiento físico y térmico de materiales poliméricos utilizados en procesos de manufactura aditiva, particularmente del ácido poliláctico (PLA), tras ser sometidos a ciclos de uso y reprocesamiento. A diferencia de otros estudios centrados únicamente en la fabricación de filamentos a partir de materia prima virgen, este trabajo evalúa de manera experimental la viabilidad técnica del reformado de residuos generados durante la impresión 3D, mediante técnicas de caracterización como microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (TGA) y medición del ángulo de contacto (WCA). De esta manera, se busca determinar si el material reciclado conserva propiedades suficientes que permitan su reincorporación funcional a nuevos procesos de extrusión, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles, técnicamente viables y alineadas con los principios de economía circular en el ámbito de la manufactura aditiva.

Dicha investigación se centra en el carácter experimental aplicado que busca la evaluación de la viabilidad técnica para dar paso directo a los procesos de síntesis de filamento y no busca una validación industrial para su realización.

1.2 Justificación

La presente investigación tiene como propósito principal determinar, mediante procesos de estudio de materiales de impresión 3D, cuáles son los cambios químicos y/o físicos que se presentan en las propiedades del material durante el proceso de extrusión del mismo. De esta manera, se pretende saber si es posible reformar el material de desperdicio y proponerlo para ser utilizado con la misma calidad que brinda un material nuevo destinado para extrusión.

Actualmente en México, y particularmente en la región noroeste, es cada vez más común que estudiantes del nivel media superior y superior, así como profesionistas, cuenten con una impresora 3D en sus espacios u oficinas, centro de estudios o incluso en sus casas, esto debido al abaratamiento de impresoras en el mercado estadounidense, que se da por su producción en masa durante los últimos años, resultando finalmente en un desperdicio cada vez mayor de material para impresión.

Es por ello que la posibilidad de crear centros de acopio de dicho material y la propuesta de tratarlos para poder ser reutilizados podría ser de gran impacto social y ambiental, generando conciencia en los estudiantes y profesionistas que utilizan la impresión 3D, abriendo así las puertas a la reducción de costos de impresión con el uso de materiales que eran considerados inutilizables y fomentando el reciclaje para el cuidado del ambiente.

A diferencia de trabajos de investigación previos, en este se busca validar los cambios del material antes mencionados y posteriormente documentar la experimentación del proceso de reformado, en conjunto a sus consideraciones de falla, que son datos que se omiten en muchos procesos publicados, dando un punto de partida para las consideraciones necesarias para llegar a un producto funcional, llegando como resultado a una impresión con este material reformado.

Desde un punto de vista de emprendimiento, se podría proponer la creación de una unidad de negocio con un enfoque centrado en la sustentabilidad de los procesos de la manufactura aditiva, teniendo la posibilidad de generar ganancias de desechos de centros particulares e industrias que usan estas herramientas de impresión 3D y generan desperdicios en diversos polímeros comerciales.

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 General

Determinar la viabilidad del reformado de materia prima de desecho de impresión 3D, mediante el estudio físico/químico del mismo, proponiendo opciones y/o tratamientos de reformado que permitan devolverle las características más adecuadas para ser reutilizado en un proceso de extrusión.

1.3.2 Específicos

- Estudiar las características físico/químicas del material de desperdicio de impresión 3D mediante la caracterización del material antes y después del proceso de impresión.
- Determinar la viabilidad de tratamiento al material de desperdicio para restaurar sus propiedades a una condición o forma que les permita ser reutilizados.
- Crear propuesta de procesadora de material de desperdicio en impresión 3D para su reutilización.
- Crear propuesta de extrusora exclusiva para materia prima después de ser reformada.

1.4 Hipótesis

El material de desperdicio de impresión 3D tratado y reformado conserva propiedades térmicas y superficiales dentro de rangos funcionales que permiten su reutilización en procesos de manufactura aditiva.

CAPÍTULO 2

2.1 Antecedentes y marco teórico

2.1.1 Orígenes de la impresión 3D

A inicios de los años ochenta, una nueva forma de fabricación industrial tomó gran auge, la llamada fabricación aditiva. Según ésta, los objetos 3D se producen agregando capas de materia prima bajo el concepto de fabricación “button-up”, en lugar de eliminar o desbastar material de un bloque de este como tradicionalmente lo hacen en la fabricación “top-down”. Esta forma de fabricación se ha llamado impresión 3D con referencia a una tecnología similar utilizada en inyección de tinta impresora 2D. (Savini, 2015)

Años más tarde, en 1989 S. Scott Crump y su pareja Lisa Crump inventan y patentan un nuevo método de fabricación llamado Fused Deposition Modeling (FDM) en el que se centra este trabajo. Con ello, surge la bioimpresión haciendo posible el uso de órganos impresos en 1999. Concretamente, se realizó con éxito el trasplante de una vejiga urinaria. (Hernandez, 2020)

Se han publicado más de 30,000 patentes sobre impresión 3D solo en los EE. UU. A lo largo de los años, se han propuesto continuamente varias tecnologías aditivas, desde la fotopolimerización hasta la deposición por fusión y recientemente la bioimpresión. Al mismo tiempo, se han puesto a disposición en la web varios programas informáticos de código abierto que ayudan en el proceso de fabricación de diferentes herramientas y/o piezas. Hoy en día el coste de una impresora 3D de sobremesa está al alcance de prácticamente todo el mundo. Por lo tanto, probablemente estemos al comienzo de una revolución en los procesos de fabricación aditiva. (Savini, 2015)

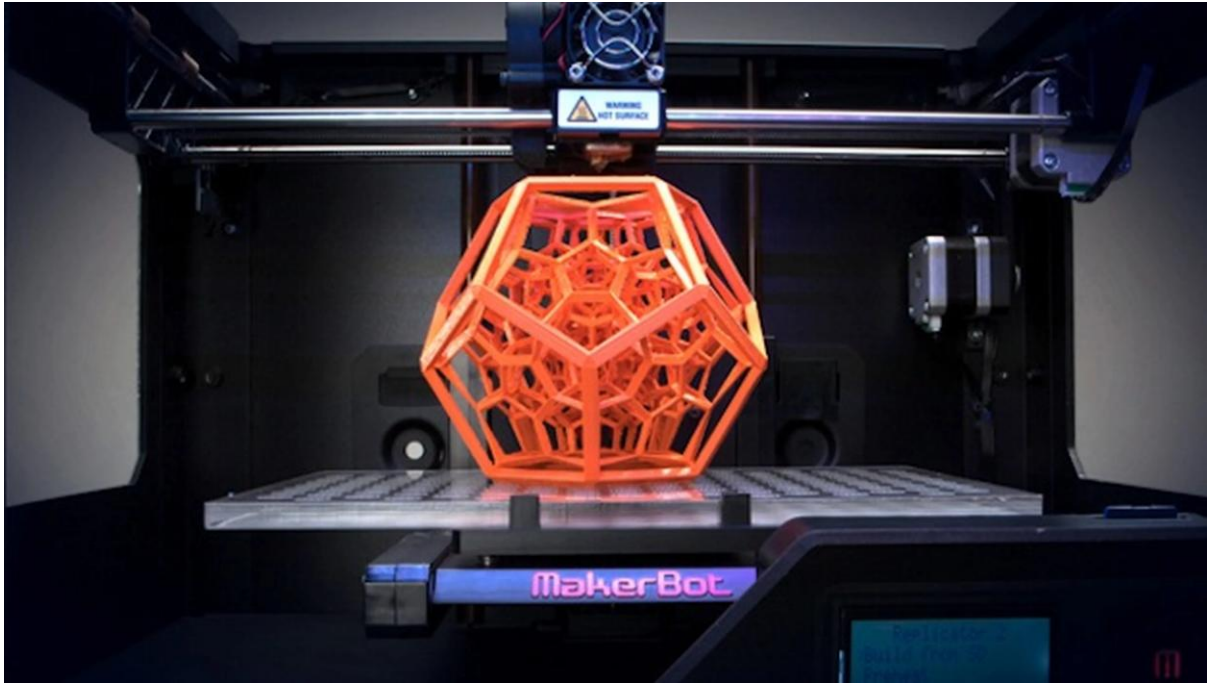
2.1.2 Principio de funcionamiento maquinaria de deposición de material fundido (FDM)

Este proceso de impresión consiste en una inyección de material fundido sobre una base con un mecanismo que le provee la capacidad de moverse verticalmente. Un cabezal automatizado con dos grados de libertad en planos ortogonales alimentado por filamento termoplástico va depositando sistemáticamente el material formando una capa. Una vez la construcción de la capa ha finalizado, la base baja para continuar con las capas siguientes hasta formar el objeto deseado. (Velasco, 2019)

La boquilla del extrusor del cabezal se mantiene a una temperatura constante y por debajo del punto de fusión del material termoplástico, haciendo eficiente energéticamente el proceso de deposición del polímero. (Velasco, 2019)

Para la creación de un objeto mediante impresión 3D, es fundamental contar previamente con un modelo digital tridimensional, el cual se desarrolla utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD). Este modelo, una vez terminado, debe ser convertido a un formato interpretable por la impresora 3D, lo cual se logra mediante el uso de programas conocidos como laminadores o “slicers”. Estas herramientas dividen el modelo 3D en capas horizontales y traducen su geometría a una serie de instrucciones codificadas bajo un lenguaje estandarizado llamado código G o G-code.

El G-code contiene un conjunto de comandos que indican a la impresora cómo debe moverse en los ejes X, Y y Z, así como también regula otros parámetros críticos como la temperatura del extrusor, la velocidad de impresión, la retracción del filamento y el flujo de material. Este sistema de instrucciones es análogo al que utilizan las máquinas CNC industriales, en las cuales los motores paso a paso se activan de forma coordinada para realizar desplazamientos precisos. En el caso de las impresoras 3D, estos movimientos permiten la deposición controlada del material fundido, capa por capa, hasta reconstruir físicamente el modelo digital inicial con un alto grado de precisión. En la **Fig. 1**, se muestra una imagen de una impresora 3D con un modelo terminado.



Fuente: Makerbot

Fig. 1. Impresora 3D en funcionamiento.

2.1.3 Técnicas de caracterización de materiales para impresión 3D

2.1.3.1 Microscopía SEM

La microscopía SEM o microscopía electrónica de barrido es una técnica muy versátil que permite obtener imágenes de alta resolución e información detallada de la superficie de las muestras. Es un tipo de microscopía electrónica que utiliza un haz de electrones enfocado para escanear la superficie de una muestra y generar imágenes con una resolución mucho mayor que la de la microscopía óptica. La resolución de los instrumentos SEM puede variar desde <1 nanómetro hasta varios nanómetros (Nanoscience, 2025).

2.1.3.2 Análisis termogravimétrico TGA

El análisis termogravimétrico (TGA) es un método de análisis térmico en el que la masa de una muestra se mide a lo largo del tiempo a medida que cambia la temperatura o a una temperatura constante durante un tiempo determinado. Se utiliza para analizar las características y composición de los materiales, las tasas de descomposición y evaporación, la oxidación, la pureza del material y muchas otras propiedades (Garza, 2024).

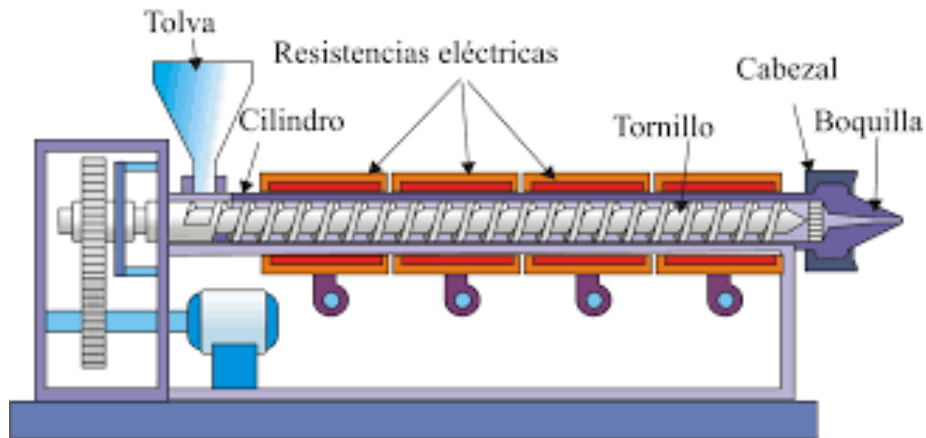
2.1.3.3 Tensión superficial por ángulo de contacto con el agua WCA

La tensión superficial mide el ángulo que forma un líquido al entrar en contacto con un sólido. Cuando las fuerzas de adherencia son muy altas el ángulo es menor de 90° ya que el líquido se ve 'atraído' por el sólido y se extiende. En el caso del agua se denomina superficies hidrófilas. En el caso de que las fuerzas de atracción sean muy bajas la superficie tenderá a 'repeler' el líquido y el ángulo será mayor de 90°, en el caso del agua se le llama hidrófobas. En el caso de encontrar estos comportamientos muy acentuados añadiremos el prefijo 'super' y tendremos las superficies superhidrófobas y superhidrófilas (Atria, 2025).

2.1.4 Fabricación de filamento 3D

El polímero utilizado en esta investigación es sometido a una serie de procesos físicos y térmicos cuidadosamente controlados, con el objetivo de obtener un producto final que cumpla con los estándares dimensionales y de calidad requeridos para su correcto funcionamiento dentro de los sistemas de impresión 3D por deposición fundida (FDM). Estos estándares, especialmente en lo que respecta al diámetro del filamento, son fundamentales, ya que incluso pequeñas desviaciones fuera de las tolerancias aceptadas, generalmente de ± 0.05 mm respecto al valor nominal de 1.75 mm, pueden provocar una serie de complicaciones operativas durante el proceso de impresión.

Entre los problemas más comunes se encuentran los atascos en los conductos de alimentación, los cuales impiden el flujo constante del material hacia la boquilla del extrusor. Además, una variación irregular en el grosor del filamento puede afectar la presión interna en el sistema de extrusión, generando errores en la deposición del material, irregularidades en las capas impresas y, en consecuencia, fallos estructurales en las piezas finales. Por estas razones, la estabilidad dimensional del filamento reformado se convierte en un aspecto crítico dentro del proceso de reciclaje, que debe ser monitoreado y corregido con precisión para garantizar su viabilidad en impresoras 3D convencionales.



Fuente: M. Beltrán y A. Marcilla

Fig. 2. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo.

Como puede apreciarse en la **Fig. 2**, el sistema de alimentación más habitual es una tolva, en la que el material a procesar se alimenta en forma de polvo o granza. El dispositivo de fusión-plastificación, bombeo y mezclado está constituido por un tornillo de Arquímedes que gira en el interior de un cilindro calentado, generalmente mediante resistencias eléctricas. En la parte del cilindro más alejada de la tolva de alimentación se acopla un cabezal cuya boquilla de salida tiene el diseño adecuado para que tenga lugar el conformado del producto. La parte esencial de la máquina es el sistema cilindro-tornillo que, como consecuencia del giro, compacta el alimento sólido, da lugar a la fusión del material y lo transporta hacia la boquilla de conformado, produciendo al mismo tiempo la presurización y el mezclado del material.” (Beltrán, Marcilla, 2010)

2.1.4.1 Pasos para la fabricación del filamento PLA y ABS.

Para el correcto procesado de materiales plásticos de forma granulada o pellet (**Fig. 3**) a filamento de impresión es necesario seguir una serie de pasos que se muestran a continuación:



Fuente: CREATEC3D

Fig. 3. Pellets de polímero plástico.

1. Tomar la resina en pla o abs, en estado granulado, que normalmente es de color blanco.
2. Meter en una trituradora la mezcla con los aditivos o pigmentos que le aportaran las propiedades estructurales como el color, resistencia, magnetismo...
3. Secado de 2 horas a una temperatura de entre 60 y 280 grados. Este paso es muy importante y si se omite por acelerar el proceso puede producir un plástico de peor calidad. Pudiendo atascar nuestro extrusor más a menudo.
4. Pasa a la extrusora de husillo simple, donde se calienta y se convierte en un monofilamento sólido.
5. Pasa a la fase de enfriamiento en un tanque de agua y es aquí donde adopta la forma redonda.
6. Recogida en un rollo automático. (CREATEC3D, 2016)

2.1.5 Crecimiento mercado global de impresión 3D

El tamaño del mercado global de impresión 3D se registró en USD 20.78 mil millones en 2023, que se estimó en USD 25.91 mil millones en 2024 y alcanzará USD 114.65 mil millones para 2031, creciendo a una tasa compuesta anual de 23.67% durante el período de pronóstico. (EXTRAPOLATE, 2025)

El mercado global de impresión 3D está experimentando un rápido crecimiento. Este aumento proviene de tecnología mejorada, adopción industrial más amplia y una

demanda creciente de producción personalizada y rápida. Con diversos sectores, este mercado abarca prototipos, desarrollo de productos, fabricación y atención médica. A medida que evoluciona la tecnología de impresión 3D, se vuelve más accesible y rentable. Las empresas están transformando sus operaciones, disfrutando de beneficios como la producción acelerada, los desechos reducidos y la capacidad de crear diseños intrincados. (EXTRAPOLATE, 2025)

El uso particular y doméstico de las impresoras 3D ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, impulsado por el abaratamiento de los equipos, la disponibilidad de materiales accesibles y la facilidad para diseñar modelos tridimensionales mediante software CAD. Este fenómeno ha generado un entorno propicio para el surgimiento de pequeños negocios y emprendimientos que ofrecen soluciones personalizadas a problemas o requerimientos específicos del mercado, brindando así una respuesta rápida, flexible y de bajo costo a la demanda de productos únicos o de producción limitada.

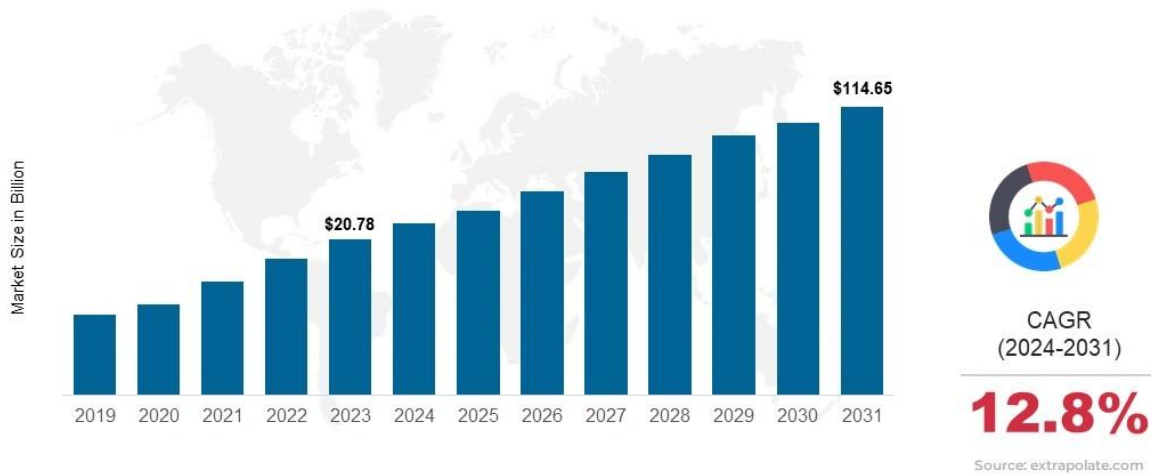
Gracias a esta tecnología, los consumidores pueden ahora obtener piezas funcionales, prototipos personalizados o productos decorativos a un precio significativamente más bajo en comparación con los métodos de manufactura tradicionales. Esto ha abierto nuevas oportunidades económicas, especialmente para emprendedores, diseñadores independientes y microindustrias, quienes encuentran en la impresión 3D una herramienta eficaz para reducir costos de producción, minimizar desperdicios y acortar los tiempos de entrega, fomentando así una economía más sostenible y descentralizada.

En este contexto, resulta de vital importancia estudiar y mejorar los procesos asociados a la reutilización de materiales de impresión, ya que, al incrementar el volumen de producción doméstica y comercial, también se incrementa la generación de residuos plásticos. La investigación del reformado de filamentos se vuelve así una alternativa viable y necesaria, alineada con los principios de economía circular y desarrollo sustentable.

3D Printing Market

Trends, By Revenue, 2024-2031

EXTRAPOLATE



Fuente: EXTRAPOLATE

Fig. 4. Gráfica de crecimiento de Mercado de impresión 3D.

En la Fig. 4, se observa un crecimiento elevado de la industria de la impresión 3D, impulsado principalmente por la constante evolución de la tecnología y la creciente demanda de soluciones personalizadas en distintos sectores productivos. Este incremento en su adopción ha generado un interés considerable en el ámbito académico, industrial y comercial, orientado hacia la búsqueda continua de estrategias de optimización de los procesos involucrados, así como en la reducción significativa de los costos finales asociados a la fabricación. Esta necesidad de optimización no solo responde a factores económicos, sino también a la urgencia de implementar prácticas sostenibles que permitan mejorar la eficiencia en el uso de materiales y energía.

2.1.6 Contaminación de la impresión 3D

Al igual que cualquier producto envasado en plástico, los residuos del material derivado del proceso de impresión 3D, generan una gran cantidad de contaminantes que tienen una larga vida antes de poderse bio-degradar. Las impresoras 3D usan principalmente 2 tipos de plásticos: el PLA que es más biodegradable, pero la mayoría utiliza filamentos ABS, que contaminan y no necesariamente son biodegradables. Todos los restos de plástico producidos por la

impresión van a parar a la basura, por la falta de estudio de propuestas de reciclaje o inclusive, la falta de una cultura en la reutilización de materiales. (Reyes, 2017)

El autor Lyndsey Gilpen indicó, haciendo mención de un estudio del Instituto de Tecnología de Illinois, EUA, que cuando una impresora 3D trabaja con algunas de sus materias primas, emite varios millones de micro-partículas por minuto, que se depositan en los pulmones o el torrente sanguíneo y plantean riesgos para la salud. (Reyes, 2017)

En ese sentido, podemos observar que los aspectos de contaminación al ambiente no solo se quedan en la pieza física desechada, sino que, de igual manera, en su utilización se generan una gran cantidad de micro partículas nocivas para la salud que, a diferencia de otros productos que el consumidor no está presente en su fabricación, la impresión 3D está cada vez está aún más presente.

Según un estudio de la Universidad de Loughborough cuando las impresoras 3D derriten plástico con calor o láser, estas consumen alrededor de 50 a 100 veces más energía eléctrica que el tradicional moldeo por inyección empleado para hacer un artículo del mismo peso. (Reyes, 2017)

Este consumo energético solamente es viable en la producción minorista, es decir, a un número reducido de piezas de un mismo diseño. Si se desea producir en masa o en grandes cantidades, la creación de moldes de inyección continúa siendo la opción más viable y eficiente.

2.1.7 Materiales para impresión 3D (Polímeros)

La manufactura aditiva se ha desarrollado en diferentes áreas de aplicación como lo son la construcción, la ingeniería o recreativas, cada una con diferentes materiales de acuerdo a las necesidades a cubrir, que van desde los materiales metálicos y plásticos hasta el uso de compuestos que se destacan en ciertas aplicaciones por sus altas resistencias físicas. Actualmente se encuentran disponibles una alta gama de variantes de materiales disponibles para los usos requeridos, pero es el área de los polímeros la que mayor aplicación y uso se tiene en la actualidad.

Los polímeros se han desarrollado por su bajo costo y su gran variedad de propiedades que desarrollan, es por ello que una cantidad considerable de procedimientos cercanos a la impresión 3D los contemplan. “Sin ninguna duda las tecnologías de impresión 3D más extendidas en las que se utilizan materiales poliméricos son FDM, SLS, SLA y Polyjet.”(León M., Fernandez A. y Rodríguez J.,2019)

Para cualquier proceso de fabricación, incluidas las tecnologías de AM, la materia prima debe formarse en un estado compatible con el proceso en cuestión (por ejemplo, polvo, lámina, filamento, líquido). Finalmente, el material debe exhibir propiedades de servicio aceptables para realizar con éxito la aplicación dada. Para la mayoría de aplicaciones de servicio estrictas, las piezas de AM generalmente se post-procesan de alguna manera para mejorar la microestructura, reducir la porosidad y para acabar las superficies, reducir la rugosidad y cumplir con la tolerancia geométrica requerida. (León M., Fernandez A. y Rodríguez J.,2019)

Las tecnologías AM o Additive manufacturing mejor conocidas como impresión 3D, contemplan una vasta variedad de procesos, los cuales buscan obtener como resultado modelos 3D físicos. Dichos procesos dan uso de diferentes polímeros, según las condiciones de trabajo de estos, expandiendo el abanico de usos posibles para todos ellos según sus propiedades.

En la industria se considera primordial el uso de materiales que presentan una mayor resistencia a la fatiga o la ruptura, pero los polímeros pueden ser seleccionados por condiciones más específicas como lo es la resistencia a ciertas sustancias o fluidos. Un ejemplo de estas son los utilizados en el sector de salud, en específico el área de la Ortodoncia, en la que es necesario que puedan ser sometidos a condiciones de humedad constante, resistiendo el desgaste y a su vez evitando ser un riesgo a la salud por algún agente contaminante que puedan contener.

Tabla 1. Propiedades de los materiales termoplásticos para FDM y su aplicación en diversas industrias [2].

Material	Propiedades	Aplicaciones/Industria
ABS	Resistente y fuerte.	Automoción, aeroespacial, dispositivos médicos.
ASA	Resistencia mecánica y estabilidad UV.	Prototipos funcionales desde soportes y carcasas eléctricas hasta prototipos de automóviles y piezas de producción prácticas para uso en exteriores bajo el sol.
Nylon 12	Buena resistencia química, alta resistencia a la fatiga y alta resistencia al impacto.	Material ideal para aplicaciones que requieren componentes de protección contra impactos y alta resistencia a la fatiga, incluidas cubiertas de antenas, herramientas de producción personalizadas, insertos de ajuste por fricción y ajustes a presión en las industrias automotriz y aeroespacial.
PC	Alta resistencia a la tracción y flexión.	Prototipos funcionales, herramientas y accesorios, moldes para las industrias automotriz y aeroespacial.
PPSF/PPSU	Excelente resistencia química y al calor y fuerza mecánica.	PPSF / PPSU puede soportar varios métodos de esterilización, incluido el óxido de etileno, autoclave y la radiación. Dispositivos médicos esterilizables, prototipos automotrices y herramientas para aplicaciones exigentes en una variedad de industrias.
PEI o ULTEM	Biocompatible, excelente resistencia mecánica y química y estabilidad térmica.	Debido a su alta relación resistencia / peso y la certificación existente, ULTEM es ideal para aplicaciones de creación rápida de prototipos y herramientas avanzadas en las industrias aeroespacial, automotriz, médica y de producción de alimentos.
PLA	Buena resistencia a la tracción y calidad de la superficie.	Ideal para modelos y prototipos que requieren detalles estéticos y ser respetuosos con el medio ambiente tanto para el hogar como para la oficina.
TPU	Excelente resistencia al desgarro y al desgaste, alto impacto, fuerza y dureza.	Flexibilidad excepcional (es decir alargamiento a la rotura) y resistencia a la corrosión para muchos productos químicos y aceites industriales comunes. Material altamente versátil con propiedades de caucho y plástico para una variedad de aplicaciones industriales.

Fig. 5. Tabla propiedades materiales termoplásticos.

En la **Fig. 5** se observan algunos de los termoplásticos más utilizados actualmente con la tecnología FDM o Fused Deposition Modeling por sus siglas en inglés, la cual es de las tecnologías que se encuentran en mayor medida al alcance de la sociedad, ya que consiste en la deposición de un material previamente calentado capa por capa, formando así una estructura, en la cual dependiendo su diseño pueden ser figuras simples o complejas.

El acrilonitrilo butadieno estireno o ABS es un termoplástico utilizado comúnmente en envases y productos de uso diario, por lo que su alta producción en otras áreas facilita a su vez la producción del mismo para otras áreas, como lo es la manufactura aditiva.

La composición que tiene el ABS es 50% de Estireno y el otro 50% se divide entre el Butadieno y Acrilonitrilo. La mezcla de cada bloque de compuestos permite que este material sea una alternativa para el desarrollo de productos. Este material puede ser extruido, moldeado mediante inyección, solapado y prensado. El material ABS no arde cuando se somete al calor, simplemente se funde y pasa a su forma líquida, pero una vez que se enfría vuelve a su estado sólido; además se puede encontrar como planchas o barras. (Aceromafe, 2023)

El ABS cuenta con numerosas variantes como lo es el ABS CF 10 que contiene un 10% de fibras de carbono el cual es “resistente y ligero a base de ABS está formulado específicamente para aplicaciones como herramientas de fabricación, plantillas y accesorios.” (Pixel, S.F.)

Por su parte el ácido poliláctico o mejor conocido como PLA actualmente se encuentra como uno de los productos líderes en la manufactura aditiva a pequeña escala, considerando su buena resistencia a la tracción y calidad de la superficie, como se presenta en la tabla 1. Su principal uso es dado en prototipos y modelos de prueba que en ocasiones es sustituido por materiales con mejores propiedades físicas según la aplicación requerida. Se deriva de materias primas naturales y renovables, como el maíz, y pertenece a los poliésteres como un polímero sintético. El almidón (glucosa) se extrae de las plantas y se convierte en dextrosa mediante la adición de enzimas. Esto es fermentado por microorganismos en ácido láctico, que a su vez se convierte en polilactida. La polimerización se produce con cadenas moleculares, similares en sus propiedades a los polímeros a base de petróleo. (Contreras, 2019)

A diferencia del ABS, el PLA es un polímero desarrollado de materia prima orgánica, no de los derivados del petróleo. Este es un punto clave al momento de decidir cuál material es en mayor medida amigable con el ambiente al producirlo.

Tabla 2. Propiedades de los materiales de Polyjet de Stratasys y sus aplicaciones [3].		
Material	Propiedades	Aplicaciones/Industria
Vero WhitePlus	Durabilidad, rigidez y alta precisión dimensional.	Adecuado para una amplia gama de aplicaciones industriales, como carcasas electrónicas, dispositivos médicos, piezas de trabajo con características complicadas.
Digital ABS	Mayor temperatura de deflexión térmica.	Prototipos funcionales, moldes de inyección, herramientas de fabricación, cajas electrónicas, modelos de presentación duraderos, piezas y cubiertas de motores.
Fullcure RGD 720	Transparente con un acabado superficial liso.	Matices de colores, aplicaciones médicas, visualización de flujo de líquidos, pruebas de ajuste de partes transparentes como el vidrio, gafas y modelos artísticos.
Rigur RGD 450	Blanco brillante, imita las propiedades de Polipropileno.	Material ideal para bisagras, envases, contenedores reutilizables y cierres flexibles en las industrias de automóviles, bienes de consumo y electrónica.
Rubber-like material	Varios elastómeros Shore A.	Agarres moldeados en las asas, juntas simuladas, juntas tóricas, teclados y tapas de botones electrónicos.
Material resistente a alta temperatura	Buena resistencia al calor con buena estabilidad.	Material ideal para probar aplicaciones como el flujo de agua caliente o el flujo de aire caliente en grifos y tuberías.
Material biocompatible	Transparente, alta estabilidad dimensional, rígida.	Material ideal para aplicaciones que requieren contacto con la piel a corto plazo (<24 horas) y a largo plazo (> 30 días).
Material dental	Buena resistencia, alta precisión y durabilidad.	Tres tipos de materiales dentales (VeroDent, VeroDentPlus y VeroGlaze) están aprobados para la colocación en la boca.

Fig. 6. Tabla propiedades materiales de Polyjet.

En la **Fig. 6** se observan los materiales mayormente utilizados en el procedimiento Polyjet, destacando sus propiedades y sus aplicaciones en el sector industrial.

La impresión 3D PolyJet es una tecnología avanzada que crea rápidamente piezas precisas utilizando fotopolímeros, luz UV y cabezales de inyección de tinta. Logra precisión mediante capas de resinas para formar materiales digitales. El proceso comienza con un modelo CAD transformado en un formato imprimible. Las gotas de fotopolímero se inyectan en la plataforma de construcción, luego se curan

con lámparas UV para unir capas. Los materiales de soporte se disuelven o se retiran manualmente para el modelo PolyJet terminado. (Stratasys, s.f.)

VeroWhite Plus es un material rígido de uso general, alta resolución y blanco opaco. Utilizando el proceso PolyJet, VeroWhite Plus tiene buenas propiedades generales. Con un corte de capa de extremadamente alta resolución (0.0006), los modelos tienen superficies de contorno lisas y la apariencia de las piezas de producción, con muy poco procesamiento posterior. (CIDEAS, 2022)

Las piezas rígidas PolyJet son excelentes para producir prototipos pequeños y medianos precisos y de alta resolución, que requieren las mejores características y detalles. Piezas tan pequeñas como 0.0125 se pueden producir con un nivel de detalle increíble. Ideal para modelos visuales y conceptuales precisos. (CIDEAS, 2022)

En el ámbito de la salud se pueden encontrar grandes aplicaciones en la ortodoncia en el uso de materiales, como el Verodent y el Veroglaze. Los cuales cuentan con propiedades como buena resistencia, alta precisión y durabilidad, lo cual es un punto importante al verse involucrado en procedimientos costosos que la ortodoncia conllevan. Es por ello que su durabilidad juega un papel importante en su uso en el área.

Los materiales dentales PolyJet se han diseñado expresamente para aplicaciones de ortodoncia y odontología digital, incluidos modelos cerámicos y alineadores. Estos materiales rígidos opacos tienen un color melocotón de aspecto natural y combinan detalles visuales de gran precisión con una gran estabilidad dimensional. (Stratasys, s.f.)

2.1.8 Propiedades específicas de polímeros con mayor presencia en la manufactura aditiva.

La industria encargada del desarrollo de polímeros adecuados para la impresión 3D, ha crecido exponencialmente los últimos años, llevando a desarrollar una gran cantidad de los mismos. Dando uso de combinaciones las cuales buscan reforzar propiedades, modificando sus composiciones químicas o reforzamientos por

el uso de fibras. Cada uno de estos polímeros es desarrollado en mayor o menor escala, según sea el uso del mismo en el mercado, es por esto que son considerados los siguientes materiales, como los más utilizados en aplicaciones recreativas y de desarrollo a pequeña escala:

- PLA
- PETG
- ABS
- Nylon

Las propiedades químicas y físicas de estos materiales varían según su composición, teniendo algunas mayores resistencias a químicos o disolventes y de igual manera en las cuestiones físicas, es posible destacar las capacidades elásticas o de esfuerzo que presentan algunos de ellos.

2.1.8.1 PLA

El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, este biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado vítreo; propiedades que pueden lograrse manipulando las mezclas entre los isómeros D(-) y L(+), los pesos moleculares, y la copolimerización. (Serna, L., & Albán, F., 2003)

El PLA tiene buenas propiedades mecánicas, si lo comparamos con las de los materiales termoplásticos estándar. Posee baja resistencia al impacto comparada con la que tienen los materiales termoplásticos estándar. (Plásticos Brello, 2018)

Entre sus propiedades físicas que mencionan Plásticos Brello (2018) se encuentran:

- Dureza.
- Resistencia al impacto.

- Rigidez.
- Elasticidad.
- Buena resistencia a la torsión.
- Es permanente.
- De color claro brillante.
- Es inodoro.
- Se obtiene de los recursos renovables y naturales.

Dichas propiedades pueden llegar variar dependiendo del fabricante y del método utilizado para su fabricación. El PLA es de los materiales para impresión 3D más utilizados en la actualidad por su fácil fabricación y su amplio catálogo de aplicaciones como lo son los sectores farmacéuticos y de alimentos. Sus temperaturas relativamente bajas de fusión le permiten ser moldeados a voluntad fácilmente, ya sean por métodos de inyección o de extrusión.

En la industria aditiva las temperaturas de trabajo de dicho material rondan alrededor de los 200 grados Celsius. Siendo considerado como uno de los que menor temperatura necesitan para derretirse y ser extruidos en comparación con otros materiales.

Algunos de los valores que el PLA presentan en sus propiedades tanto físicas como mecánicas que mencionan Plásticos Brello (2018) son:

- Densidad 1,24 g/cm³.
- Resistencia a la tracción de 3309 MPa.
- El límite elástico es de 55 MPa.
- Resistencia a la compresión 66 MPa.
- Resistencia a la flexión de 485 MPa.
- Temperatura de deformación 55°C.
- Muy baja resistencia a la humedad.
- Elongación 3%.

Entre sus valores térmicos se destacan los siguientes:

- Punto de fusión 145°C.

- Temperatura de transición vítrea de 60°C.
- Mínima temperatura en servicio de 20°C.
- Calor específico ($1,18 \cdot 10^3 - 1,21 \cdot 10^3$) J/Kg*°C.
- Máxima temperatura de servicio de 55°C .
- Conductividad térmica de 0,13 W/m*°C.

2.1.8.2 PETG

PET (polietilentereftalato) es un polímero plástico que se obtiene mediante un proceso de polimerización de ácido tereftálico y monoetilenglicol. Es un polímero lineal, con un alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. (Acoplasticos, 2022)

El PETG es uno de los copolímeros más usados en la industria de la impresión 3D. Su distinción se debe a la combinación del PET con glicol, esto mejora las propiedades del PET convirtiéndolo en PETG con un proceso de glicosilado. El PETG es producto por la polimerización del PET, lo que significa, el agregar ciclohexano dimetanol (CHDM) y reemplazar al etilenglicol, consiguiendo una cadena de átomos más larga, puesto que, con este efecto se consigue retardar la cristalización cuando las piezas fabricadas en PETG son sometidas a esfuerzo. Por su facilidad de extrusión y estabilidad térmica, el PETG y otros derivados del PET son cada vez más usados en el mundo de la impresión 3D FDM. (Beltrán J., 2023)

El PETG al ser de los principales materiales utilizados en la industria aditiva, cuenta con propiedades muy útiles y eficaces para las necesidades del mercado, como lo menciona Tractus 3D (2020) algunas de ellas son:

- Durabilidad.
- Flexibilidad baja.
- Resistencia química.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al agua.

Algunas de las propiedades químicas y físicas cuantitativas del PET según Beltrán (2023) son:

- Densidad 1360 kg/m³.
- Módulo de flexión 3 GN/m².
- Tensión Máxima 75 MN/m².
- Fuerza de tensión 68.9 Mpa.
- Módulo de tensión 2.8 - 4.1 Gpa.
- Temperatura máxima usada: 204 grados centígrados.
- Elongación ruptura 70%.

2.1.8.3 ABS

El polímero ABS es un terpolímero amorfo que se fabrica combinando tres compuestos distintos. Los tres elementos que componen el plástico ABS son el acrilonitrilo, el butadieno y el estireno. Usando diferentes combinaciones de estos monómeros se pueden fabricar diversos tipos de plástico ABS con propiedades diferentes mediante ramificación o copolimerización. El material ABS tiene la peculiaridad única de ser un puente entre los termoplásticos industriales de uso general y los termoplásticos de ingeniería de altas prestaciones. (Ensinger, 2023)

Según la composición y el proceso de fabricación de este material se pueden presentar propiedades específicas, pero algunas de las que Ensinger (2023) destaca son:

- Rentabilidad.
- Disponibilidad en color natural y negro.
- Fácil unión.
- Resistencia a rayos gamma y X.
- Mecanización fácil.

Al ser un material utilizado en la industria automotriz, de alimentos y de la salud, su producción es generada a escalas industriales, lo que permite la fácil obtención del mismo a bajo costo. De igual manera sus propiedades químicas son favorables en un número considerable de aplicaciones. Algunas de estas propiedades como lo menciona Beltran (2023) son:

- Densidad 1360 kg/m^3 .
- Tensión Máxima 38 MN/m^2 .
- Módulo de flexión $3 \text{ (GN/m}^2)$
- Elongación de ruptura 8%

2.1.8.4 Nylon 66

El Nylon es un polímero de la familia de las poliamidas y es artificial. Es un polímero semicristalino y con un buen cuadro de propiedades mecánicas, tenacidad alta y resistencia al desgaste. Debe ser estabilizado, calentado en hornos a temperaturas cercanas a la fusión durante días, para eliminar las tensiones internas que evitan que, al mecanizar, salgan fisuras. (MECASINC, s.f.)

La materia prima para conseguir el Poliamida 66 es el benceno, que se deriva del craqueo y de la reformación del petróleo. Además, se conoce como nylon 66 porque en cada unidad de la cadena polimérica, hay dos extensiones de átomos de carbono, cada uno con una longitud de seis átomos de carbono. (MECASINC, s. f.)

Al igual que los materiales antes mencionados el Nylon en específico el clasificado como Nylon 66, se le atribuyen una gran cantidad de propiedades, física, químicas y mecanizadas, las cuales le permiten ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones.

Algunas de estas como lo menciona MECASIN (s. f.) son:

- Buenas propiedades mecánicas
- Buena rigidez, dureza y estabilidad térmica
- Buena absorción de la humedad
- Alta resistencia a los impactos y golpes

- Una buena capacidad de amortiguamiento
- Buena resistencia a la abrasión

Las propiedades químicas numéricas que Matmatch (2023) muestra son:

- Densidad 1.14 g/cm³
- Esfuerzo de tensión 80 Mpa
- Absorción de agua 1.6%
- Temperatura de Fusión 255 Grados centígrados
- Coeficiente de fricción .55

Según Beltran (2023) otras propiedades a destacar son:

- Módulo de flexión 2.8 GN/m²
- Elongación de Ruptura 60%

Se pueden observar y analizar una mayor cantidad de polímeros utilizados en la industria de manufactura aditiva, los cuales podemos observar en la **Fig. 7**.

Material	Densidade (kg/m ³)	Tensão máxima (MN/m ²)	Módulo de flexão (GN/m ²)	Elongação na ruptura (%)	Preço com relação ao PP
PET	1360	75	3	70	3.0
ABS (alto impacto)	1040	38	2.2	8	2.1
SAN	1080	72	3.6	2	1.8
Nylon 66	1140	70	2.8	60	3.9
Nylon 66 (33% FV)	1380	115	5.1	4	4.0
Acrílico	1180	70	2.9	2	2.5
Epóxi	1200	70	3.0	3	8.3
PEEK	1300	62	3.8	4	42
PC	1150	65	2.8	100	4.2
PP	905	33	1.5	150	1
PS	1050	40	3.0	1.5	1.1
PEAD	950	32	1.2	150	1.1
PVC (rígido)	1400	50	3.0	80	0.88

Fig. 7. Tabla de propiedades de materiales plásticos.

2.1.9 Degradación térmica de polímeros

Durante la extrusión e inyección, los polímeros experimentan cizalla y altas temperaturas que causan degradación térmica, mecánica y química, los cuales pueden provocar significativos cambios, no solo en las propiedades reológicas de la masa fundida, sino también en las propiedades ópticas y mecánicas del producto final [6]. Para monitorear la evolución de las propiedades de materiales poliméricos durante su procesamiento, se han empleado algunas técnicas, las cuales pueden ser cualitativas o cuantitativas, como la reología, espectroscopia de absorción, atenuación ultrasónica, microscopia de imagen, dispersión de luz y colorimetría (análisis de cambio de color) (Rojas González, A. F., & Osswald, T. A., 2016)

Varios estudios han demostrado que la colorimetría es una valiosa herramienta para evaluar las condiciones de procesamiento o los cambios en la estructura del material. El análisis de cambio de color se ha utilizado para evaluar la influencia de la adición de bases de estabilización sobre la reciclabilidad del polipropileno por reprocesamiento en extrusión y la degradación a la intemperie de materiales compuestos de madera con polietileno de alta densidad y polipropileno. Reis et al. observaron un aumento en la intensidad del color amarillo de polipropileno/nanocompuestos montmorillonita después de múltiples extrusiones. También se han analizado los cambios experimentados por nanocompuestos de poliamida 6 en la reprocesamiento por moldeo por inyección, la degradación por reprocesamiento en extrusión de nanocompuestos de ABS/MMT y PP/MMT y la degradación por inyección de polietileno durante la reprocesamiento. Remili et al. estudiaron el efecto de la reprocesamiento sobre el cambio de color en poliestireno y nanocompuestos de poliestireno/cloisita 15A, encontrando que el nivel de color es más pronunciado cuando el número de ciclos aumenta, indicando que hay degradación térmica. (Rojas González, A. F., & Osswald, T. A., 2016)

El análisis de color se llevó a cabo en un colorímetro microcolor de tres estímulos, marca X-Rite Color Master modelo 8200, que utiliza el programa CM2, de acuerdo a la ASTM D 2244-11. Los tres estímulos de color evaluados fueron: el factor de luminancia L, el cual mide el carácter de luminosidad y oscuro; y las coordenadas de cromaticidad, que son el índice de saturación al rojo a, que mide el carácter rojo-verde; y el índice de saturación al amarillo b, que cuantifica el carácter amarillo-azul

de la luz. El equipo mide estos tres parámetros para la muestra estándar, la cual es el polímero virgen o polímero sin procesar, y después se miden para la muestra reprocesadas. Con esta información, el programa calcula los cambios en estos parámetros obteniendo ΔL , Δa y Δb respecto a la muestra de referencia. (Rojas González, A. F., & Osswald, T. A. ,2016)

La **Fig. 8** muestra el cambio de color que sufre el PLA al ser reprocesado por inyección. Aquí se observa que la muestra pasa de un color blanco transparente a un color amarillo opaco, indicando visualmente que el polímero sufre degradación térmica debido al proceso de inyección. Similares resultados de cambio de color se encontraron para el PLA, el cual experimentó varios procesos de transformación consecutivos. Los resultados de la **Fig. 9** se confirman con los datos presentados en la **Fig. 8**, donde se muestran los valores del análisis de cambio de color obtenido por medio de la ecuación empírica de Hunter-Scotfield. En esta tabla se puede ver que el cambio en el factor de luminancia L disminuye, mientras que en el índice de saturación al rojo Δa , en el índice de saturación al amarillo Δb y en el cambio de color ΔE , aumentan con el número de reprocesamientos. (Rojas González, A. F., & Osswald, T. A. ,2016)

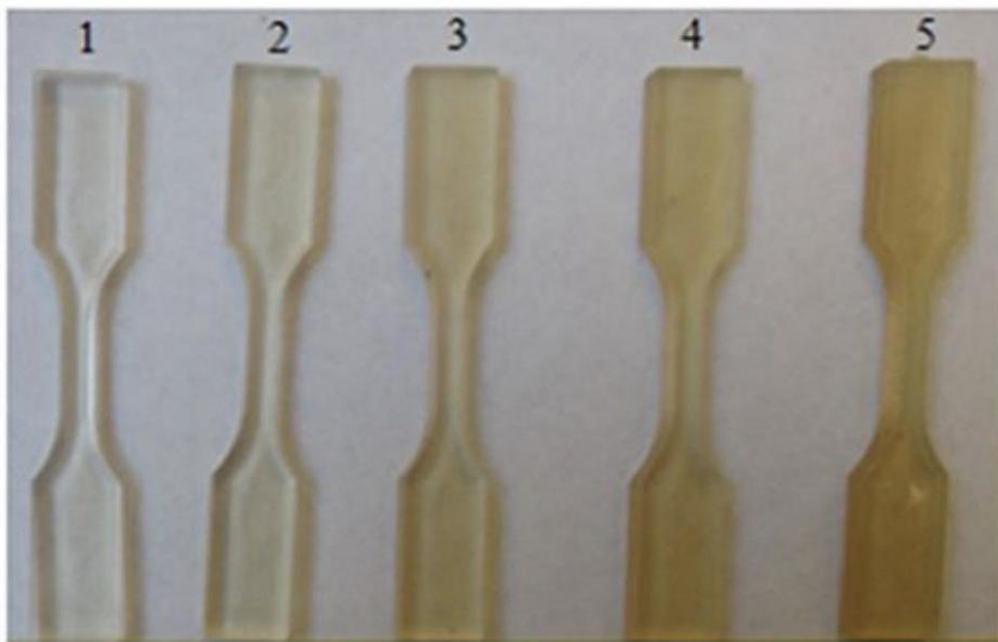


Fig. 8. Cambio de color en muestras de PLA obtenidas en el proceso de inyección.

Ciclo	ΔL	Δa	Δb	ΔE
0	0	0	0	0
1	-2.1	0.23	1.46	2.57
2	-3.01	0.34	3.01	4.27
3	-3.56	0.53	4.35	5.65
4	-3.96	0.86	5.21	6.60
5	-4.57	0.98	4.93	6.79

Fig. 9. Tabla del cambio de color durante el reprocesamiento de PLA en inyección.

2.1.10 Reprocesamiento mecánico de termoplásticos

El reciclaje mecánico es uno de los métodos físicos en el cual materiales posconsumo son transformados en materias primas secundarias que permiten ser utilizados en algunas aplicaciones como sustitutos de los materiales vírgenes. El reciclaje mecánico es principalmente aplicado a polímeros termoplásticos como el polipropileno, el polietileno, el poliestireno y el policloruro de vinilo. (Ebeling, F.-W., Huberth, H., Schirber, H., & Schlör, N., 2002).

Debido a las características fisicoquímicas de los polímeros termoplásticos es posible someterlos a procesos térmicos varias veces, pero van perdiendo sus propiedades mecánicas con cada ciclo de procesamiento debido a que sufren degradación. Esta disminución en las propiedades hace que los plásticos reciclados sean empleados en productos que requieran menos exigencias mecánicas. Cada polímero termoplástico debe ser sometidos a diferentes condiciones térmicas que aseguren una materia prima de calidad y pueda ser llevado al mercado. (Menges, G., Flórez, J., & Osswald, T. A., 2010).

a) Separación de los residuos plásticos:

Se realiza para para separar los residuos plásticos posconsumo, especialmente aquellos que han estado en contacto con sustancias tóxicas que puedan afectar el ambiente microbiológico teniendo en cuenta la normatividad ambiental competente. El proceso de separación consiste normalmente en clasificar la materia prima de

acuerdo con su color y tipo, ya que estos residuos pueden estar acompañados de otros materiales orgánicos y/o inorgánicos como papel, metal, etiquetas, que deben ser retirados para continuar con el proceso de reciclaje mecánico. (La Mantia, 2002)

b) Trituración:

Es el proceso por el cual se reduce el tamaño de las partículas de los residuos con el propósito de poder ser introducidos en el sistema de alimentación de los procesos de transformación. Se utilizan equipos de molienda o trituración para plásticos dependiendo del termoplástico que va a ser sometido a este método. Luego de este proceso, se obtiene un material con una geometría de escamas con un tamaño aproximado de 1 a 2 centímetros. (La Mantia, 2002)

c) Lavado:

En esta etapa se elimina la suciedad y contaminación de las escamas. Normalmente consiste de dos etapas: en la primera las escamas son introducidas a un tanque con cuchillas en el fondo lo que permite con la ayuda de agua y en algunas ocasiones jabón o detergente eliminar pantano, pigmentos, aceites. En el segundo, se aprovecha las diferentes densidades para hacer flotar en un tanque con agua el material de interés y los contaminantes se precipitan. (La Mantia, 2002)

d) Secado:

Debido al proceso de lavado, las escamas presentan un alto contenido de humedad por lo que es necesario realizar un secado a estas escamas. Algunas empresas utilizan hornos o centrifugas teniendo una temperatura que no afecte el material y pueda ser utilizado fácilmente en procesos de extrusión o inyección. Al final de todas estas etapas, se realiza un proceso de peletizado para obtener materia prima útil para la fabricación del producto terminado. (La Mantia, 2002)

CAPÍTULO 3

3.1 Metodología

La investigación se basará en un estudio teórico/experimental que permita la obtención de datos reales de la composición físico/química de dichos materiales tras su ciclo de trabajo en el proceso de impresión 3D.

3.1.1 Determinar el cambio en las propiedades del material de desperdicio mediante estudio físico/químico.

Para poder iniciar con los estudios será necesario enlistar los materiales candidatos a evaluar, llámase PLA, ABS u otros, considerando como primordiales aquellos que sean más utilizados, o mayormente producidos, facilitando así la obtención de los mismos mediante centros de acopio. Se estudiarán a detalle las propiedades de estos materiales para conocer las estructuras que estos forman y los cambios que la misma sufre después de la extrusión y solidificación. Cada material cuenta con diferente coloración o textura dada su composición, como las que se observan en la **Fig. 5**.



Fuente: Dayton Solutions

Fig. 10. Carretes de diversos materiales de impresión 3D

Mediante pruebas de laboratorio, revisión de estructura en microscopios especializados y diferentes tratamientos posibles, se obtendrán los resultados de los cambios en la composición/propiedades de los materiales seleccionados.

Dado el periodo requerido para pruebas y validaciones necesarias, se selecciona el ácido poliláctico (PLA) como el material de impresión con mayor presencia en la industria de la manufactura aditiva, lo que facilita la obtención del mismo. Un punto importante para su reciclaje es la pertenencia a los polímeros termoplásticos a diferencia de los elastómeros que complican su proceso.

“Los elastómeros son polímeros o tipos de plásticos que, sin estar compuestos por elementos metálicos, tienen la capacidad de deformarse o extenderse por fuerzas externas y, una vez que se retira la fuerza, regresan a su forma original sin perder sus cualidades.” (Pochteca, 2022)

Dado esta característica resistiva a la deformación plástica, son mayormente susceptibles a degradación en la presencia de altas temperaturas, por lo que siguiendo la clasificación de los polímeros se procede a estudiar los cambios en el mencionado polímero termoplástico. Los termoplásticos son una categoría de polímeros ampliamente utilizados en diversas industrias debido a sus propiedades únicas, como la capacidad de ser fundidos y moldeados repetidamente. Esto los convierte en una opción ideal para productos reciclables y sostenibles. (SINTAC, 2025)

Se procede a iniciar los estudios requeridos para validar el reformado del polímero de impresión 3D.

3.1.1.1 Microscopía SEM

Para conocer y analizar la estructura de un material, es necesario considerar una gran cantidad de factores que pueden influir en sus propiedades físicas y químicas. Sin embargo, para simplificar el estudio y enfocarnos en aspectos clave, se definen dos parámetros primordiales que permitan, de manera directa y tangible, percibir cualquier cambio que el material pueda sufrir cuando es sometido a su ciclo de trabajo habitual.

Estos parámetros se seleccionan pensando en características físicas medibles que reflejan con claridad la posible degradación, alteración o mejora que ocurra durante el uso del material, facilitando así la comparación entre el estado inicial y el estado posterior al proceso. De esta forma, se busca obtener información relevante que permita evaluar la viabilidad del material reformado y entender cómo su estructura responde a las condiciones reales de operación.

Para poder observar el material mediante la microscopía electrónica mencionada, es recomendable primero encapsular la muestra en un material epóxico. Esto se hace con el fin de facilitar una manipulación más controlada y segura durante el proceso de preparación para un pulido y análisis. Esta encapsulación es particularmente importante porque el material nuevo presenta una dimensión diametral muy pequeña, no mayor a 1.75 mm, lo que dificulta considerablemente su manejo y procesamiento de pulido previo a la observación para el barrido electrónico.

Una vez encapsulada la muestra en el epóxico, se procede a realizar un proceso cuidadoso de lijado. Este paso es fundamental para exponer adecuadamente el interior del material, permitiendo revelar la estructura interna sin dañar o comprometer la integridad del polímero ni la unión con el epóxico. De esta forma, se evita que los resultados se vean sesgados o distorsionados por artefactos causados por un mal tratamiento de la muestra. La correcta preparación garantiza que las imágenes obtenidas reflejan fielmente las características reales del material.

El proceso de análisis comienza con la observación del filamento recién obtenido del carrete, que sirve como muestra de referencia. Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento con el material extruido, que ya ha sido procesado previamente por el extrusor de la impresora FDM. Esta elección es intencional, ya que se busca evitar cualquier variación que pudiera generarse por el uso de lotes diferentes de filamento o materiales provenientes de fabricantes distintos, asegurando así una comparación válida y homogénea entre las muestras.

En ambos casos, se sigue rigurosamente el procedimiento establecido para el posicionamiento adecuado de la muestra dentro del microscopio y para el ajuste de

parámetros críticos, tales como el voltaje de aceleración, el tamaño del punto y la distancia de trabajo. Además, se ajustan parámetros de imagen como el brillo y el enfoque, que se realizan tanto de forma gruesa como fina, para lograr la máxima calidad visual y un análisis preciso de la morfología del material.

3.1.1.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

Se desarrolla el método de análisis termogravimétrico TGA siguiendo de manera puntual los lineamientos establecidos por la técnica, considerando desde el inicio la posibilidad de que el material pueda estar perdiendo parte de su masa durante los distintos procesos de extrusión a los que es sometido. Esta hipótesis parte de la observación de que los materiales poliméricos, al ser expuestos repetidamente a altas temperaturas, pueden experimentar algún tipo de degradación térmica que afecte su estabilidad y composición.

Por este motivo, como primer paso del procedimiento, se decide someter a las condiciones del análisis térmico una muestra del polímero en su estado completamente nuevo, es decir, directamente tomada del carrete de filamento antes de cualquier uso o transformación. Esta muestra inicial tiene como objetivo principal establecer una línea base de comportamiento térmico, permitiendo observar cómo reacciona el material virgen frente al aumento progresivo de temperatura a lo largo del tiempo. De esta forma, se obtiene un punto de comparación válido que será utilizado más adelante.

Una vez realizado este primer análisis, se procede con la evaluación del material reformado, es decir, aquel que ya ha sido utilizado en un ciclo de trabajo, recolectado, procesado nuevamente y preparado para su reutilización. El objetivo en este caso es establecer una comparativa directa entre el comportamiento térmico del polímero en su estado original y en su estado reformado, buscando identificar posibles diferencias que indiquen pérdidas de masa, alteraciones en su estructura, o cambios relevantes en el momento y la forma en que el material responde al aumento de temperatura. Esta comparación es esencial para determinar la viabilidad del

reformado del material y evaluar si mantiene las propiedades necesarias para un segundo uso funcional dentro del proceso de impresión 3D.

Un instrumento de TGA/DSC le permite medir incluso eventos térmicos que no provocan un cambio de masa, como la fusión, la transición vítrea u otro tipo de transiciones de fase sólido-sólido. (METTLER TOLEDO, s. f.)

Considerando los puntos de cambio en los polímeros, se descarta la posibilidad de sesgo de resultados deseados en la presencia de afectaciones por cambios de fase en el mismo.

3.1.1.3 Medición por ángulo de contacto con el agua (WCA)

Como un parámetro adicional dentro del análisis general del comportamiento del material, se toma en cuenta la respuesta del polímero reformado ante la presencia de agua, enfocándose especialmente en sus capacidades de retención o repulsión del líquido a través de mediciones de tensión superficial por ángulo de contacto (WCA). Este aspecto es relevante porque puede aportar información complementaria sobre la estructura superficial del material y su nivel de porosidad, así como sobre posibles cambios físicos sufridos durante el proceso de reformado o reciclaje.

Para llevar a cabo esta prueba de forma adecuada y obtener resultados que sean útiles, se prepara una muestra plana con un diámetro considerablemente amplio, lo cual permite una mejor observación del comportamiento de la gota de agua al entrar en contacto con la superficie del material. Este método busca obtener con mayor precisión el ángulo de contacto que se forma entre la gota y el material, lo cual nos da una idea clara sobre si el polímero tiende a repeler el agua (superficie hidrofóbica) o a absorberla (superficie hidrofílica). Además, la prueba puede revelar si existen variaciones en la porosidad del material reformado, en comparación con el material simplemente extruido sin modificaciones.

En esta prueba en particular, se descarta el análisis del material nuevo (sin haber pasado por ningún ciclo de trabajo), ya que sus dimensiones reducidas hacen inviable una medición precisa del ángulo de contacto. Esta limitación impide obtener un resultado coherente o comparable con el resto de las muestras trabajadas. Por lo

tanto, se prioriza el estudio del polímero que ya ha sido extruido y reformado, al ser el que presenta condiciones físicas adecuadas para la prueba y mayor relevancia dentro del objetivo del análisis.

3.1.2 Determinar viabilidad de tratamiento al material para restaurar composición original.

Como toda materia prima utilizada en la manufactura aditiva por impresión 3D a pequeña escala, que es modificada para ser moldeada en un producto, será necesario determinar si es posible agregar o modificar elementos de su composición que le permitan devolver las propiedades que se tenían originalmente. Mediante pruebas de laboratorio se analizarán las opciones de agregados y tratamientos que se les dará a estos materiales.

Una vez teniendo los resultados previos, se evaluarán las condiciones necesarias para poder generar o reformar el compuesto correcto, según las especificaciones originales y las características obtenidas de las muestras antes de haber sido sometidas a su ciclo de trabajo.

Al ser materiales relativamente accesibles, nos será posible realizar las pruebas necesarias de tratamientos y estudios del mismo, considerando claramente que mientras más se estudien y caracterizan, mayor serán los resultados que robustecen la presente propuesta. Para esto se desarrollarán los diseños de experimentos necesarios que nos permitan proyectar los tiempos de estudio y la viabilidad de formular las propuestas para el reformado del material de desperdicio de la impresión 3D.

Se considera la posibilidad del dopado del material con aditivos como lo son las fibras o los nanotubos de carbono, siendo necesario la obtención primeramente de los resultados de las pruebas fisicoquímicas, lo que daría la pauta de su relevancia o necesidad dada la varianza de masa o propiedades en el polímero.

Los materiales de polímero reforzado con fibra (PRF) son materiales compuestos que suelen consistir en fibras resistentes incrustadas en una matriz de resina. Las fibras aportan resistencia y rigidez al compuesto y, por lo general, soportan la mayor parte de las cargas aplicadas. La matriz actúa uniendo y protegiendo las fibras, así como facilitando la transferencia de tensión entre ellas mediante esfuerzos cortantes. Las fibras más comunes son las de vidrio, carbono y sintéticas.” (ACI, s. f.)

Como principales opciones para el refuerzo del material, se consideran las fibras de carbono, ya que han demostrado ofrecer una alta resistencia mecánica sin implicar un aumento considerable en la masa total del compuesto. Esta característica las convierte en una alternativa eficiente cuando se busca mejorar el desempeño estructural del material sin comprometer su ligereza, lo cual es especialmente importante en aplicaciones como la impresión 3D, donde el peso puede influir directamente en la calidad y funcionalidad de las piezas finales.

De igual manera, se toman en cuenta las fibras de vidrio, las cuales, aunque presentan una densidad ligeramente superior a las de carbono, siguen siendo una opción viable debido a su bajo costo de producción y a su buena resistencia frente a esfuerzos cortantes y tensiones. Estas propiedades hacen que las fibras de vidrio se posicionen como una solución accesible para mejorar la durabilidad del material impreso, especialmente en piezas que estarán sometidas a cargas mecánicas constantes o condiciones de uso más exigentes. En conjunto, ambas opciones de refuerzo permiten ampliar el rango de aplicación del material, adaptándolo a distintos requerimientos sin necesidad de modificar drásticamente el proceso de impresión o los parámetros ya establecidos.

“Los nanotubos de carbono son hojas de grafeno enrolladas que forman una pieza cilíndrica con un diámetro cercano a 1 milímetro y dependiendo de cómo se enrolla la hoja de grafeno, pueden presentar propiedades metálicas o semiconductoras.” (Nanotec, 2019)

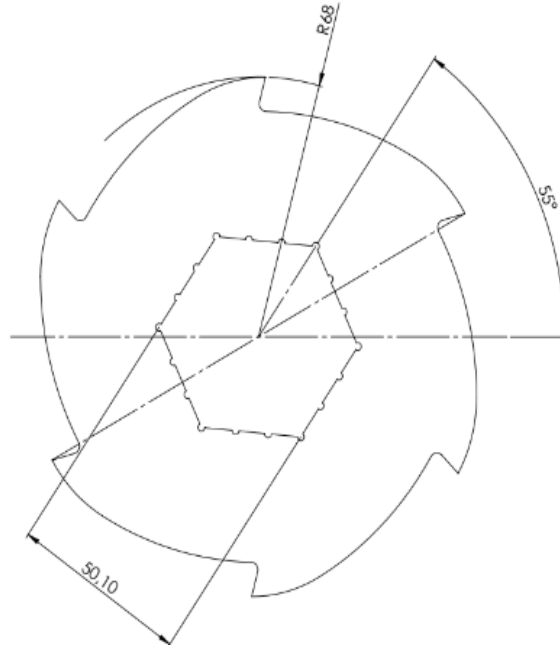
Dando uso de los mismos, se generaría un refuerzo en el material el cual podría suplir las deficiencias del mismo después de su ciclo.

3.1.3 Propuesta de procesadora de material.

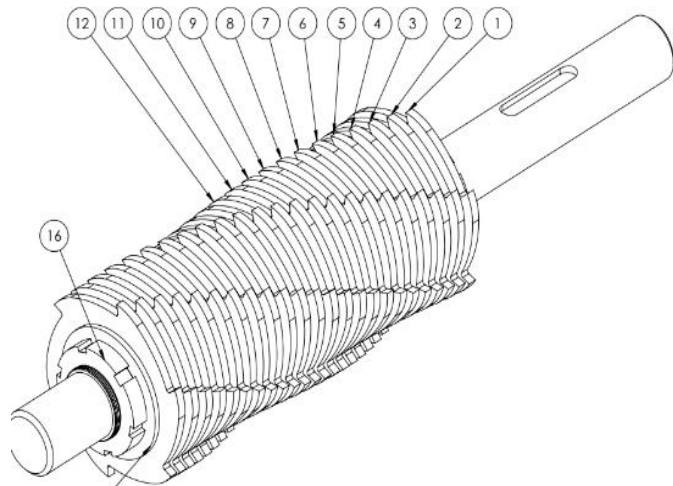
Conociendo la viabilidad del tratamiento de los materiales, es necesario crear bosquejos y diseños 3D en herramientas y sistemas de cómputo, como el programa Solidworks, para poder simular el comportamiento de la máquina que hará posible el procesamiento del material de desperdicio de la impresión 3D, llevarle a una forma que permita darle los tratamientos necesarios y posterior a esto, moldearlo a una medida similar al filamento estándar dada en el mercado.

Al ser materiales con valores de dureza bajos, facilitará el diseño de una máquina o herramienta que los pueda triturar y preparar para su tratamiento. Actualmente, es posible encontrar una gran cantidad de máquinas de calidades y precios variados que podrían servir como una base para el desarrollo del prototipo aquí planteado.

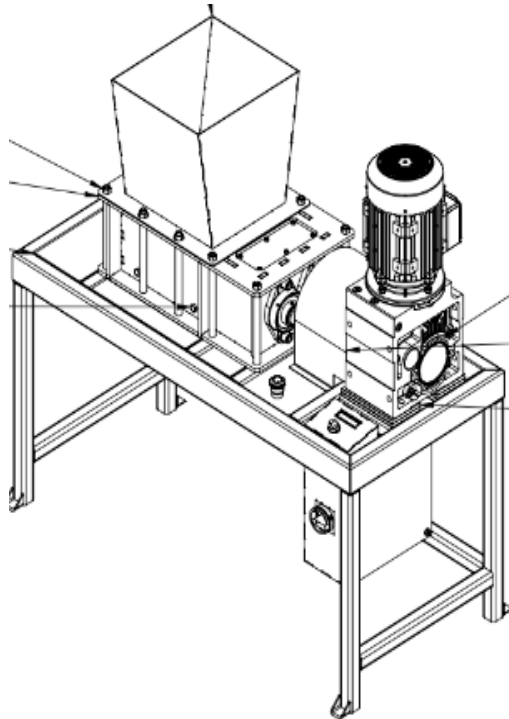
Se toma en cuenta la posibilidad del uso de diseño funcional de fuente abierta de máquina trituradora, la cual se fabrica a partir de placas de acero cortadas con plasma, ensamblando para crear, tanto las cuchillas, como la tolva de alimentación a las mismas. Las **Figuras 11,12 y 13** muestran un diseño que se comparte en una de las bibliografías consultadas, la cual contiene planos de las piezas individuales y del ensamble completo.



Fuente: 3R Consejos de Reciclaje.
Fig. 11. Plano de diseño de cuchilla de trituradora de plástico.



Fuente: 3R Consejos de Reciclaje.
Fig. 12. Plano de diseño de configuración de cuchillas de trituradora de plástico.



Fuente: 3R Consejos de Reciclaje.
Fig. 13. Plano de diseño de trituradora de plástico.

En métodos más económicos consideran alternativas para el tratamiento de los residuos o desperdicios generados durante los procesos de impresión 3D, haciendo uso de herramientas menos robustas y accesibles, tales como procesadoras de alimentos o máquinas de corte de alta velocidad. Estos equipos, aunque no están diseñados originalmente para el manejo de polímeros, ofrecen una solución práctica para la trituración inicial del material, especialmente en entornos donde no se dispone de maquinaria industrial especializada para el reciclaje.

Dentro de este contexto, se identifica el factor de la dureza del material como la principal limitante para una trituración eficiente. Al ser un parámetro que determina la resistencia del polímero a las fuerzas mecánicas aplicadas por estos dispositivos, influye directamente en la viabilidad del procesado. Por esta razón, se realiza una clasificación de los residuos generados, agrupándolos en tres categorías principales que permitirán su manejo posterior de manera más ordenada y eficaz.

Las agrupaciones definidas son las siguientes:

1. Soportes de impresión 3D, que suelen ser estructuras auxiliares frágiles y de fácil fragmentación.
2. Diseños incompletos o fallidos, generados por errores durante el proceso de impresión, los cuales pueden tener geometrías irregulares y mayor masa.
3. Filamento acumulado o agrupado por falta de adherencia, que incluye restos de material expulsado sin llegar a formar parte de una pieza, usualmente en forma de nudos o cúmulos.

Esta clasificación permite un abordaje más eficiente del reciclaje, facilitando el tratamiento específico según las características físicas de cada grupo y optimizando así las etapas posteriores del reformado del material.

3.1.4 Propuesta de extrusora de filamento.

Posterior al tratamiento y moldeado de los diferentes materiales, es necesaria la creación de una segunda máquina que permita la extrusión del material de una forma uniforme y constante, logrando así generar carretes completos de material de impresión 3D retrabajado, teniendo como resultado el producto final esperado por la investigación, análisis, diseño y manufactura.

Este prototipo puede ser resuelto con máquinas ya existentes en el mercado permiten introducir el material por un costado y obtener una extrusión del mismo a una medida estándar, o modificarse al deseado si es necesario, reduciendo tiempos; sin embargo, es necesario realizar el análisis de costos, para así seleccionar la opción más viable, entendiéndose por construir el instrumento de extrusión en su totalidad o adoptar un modelo comercial.

En una definición amplia el proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una

boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida (Beltran, 2010).

CAPÍTULO 4

4.1 Resultados y Discusiones

4.1.1 Imágenes por microscopía SEM

4.1.1.1 PLA

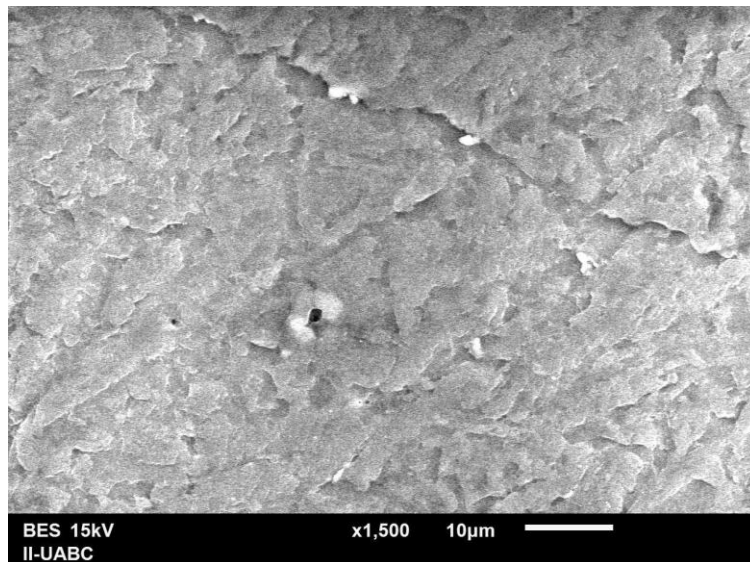


Fig. 14. Antes de extrusión

Como primer resultado dentro del análisis, podemos observar que el grano del material (**Fig. 14**), antes de ser sometido al proceso de extrusión, presenta un tamaño que oscila entre los 4 y 8 micrómetros. Este rango nos proporciona una referencia inicial clave sobre la estructura física del material en su estado original, lo cual es importante para identificar posibles alteraciones que puedan producirse como consecuencia de la exposición a temperaturas elevadas durante el proceso de impresión. Al contar con este valor base, se facilita el seguimiento de cualquier cambio significativo en la morfología del grano una vez que el material ha sido procesado.

Para la captura de estas imágenes y la caracterización precisa del tamaño del grano, se define un voltaje de aceleración de 15 kilovoltios (kV), que es el valor utilizado en el equipo de microscopía electrónica para lograr una visualización adecuada del material. Este parámetro no solo es esencial para garantizar una

resolución óptima durante la observación, sino que también será reutilizado en la siguiente prueba, donde se analizará el mismo material tras haber sido sometido al ciclo de impresión. De esta manera, se garantiza que las condiciones experimentales se mantengan constantes, lo que permite una comparación más precisa y confiable entre el estado inicial del material y su estado posterior. Con ello, se sigue de forma rigurosa la metodología establecida, asegurando que las variaciones observadas sean atribuibles al proceso térmico y no a diferencias en los parámetros de análisis.

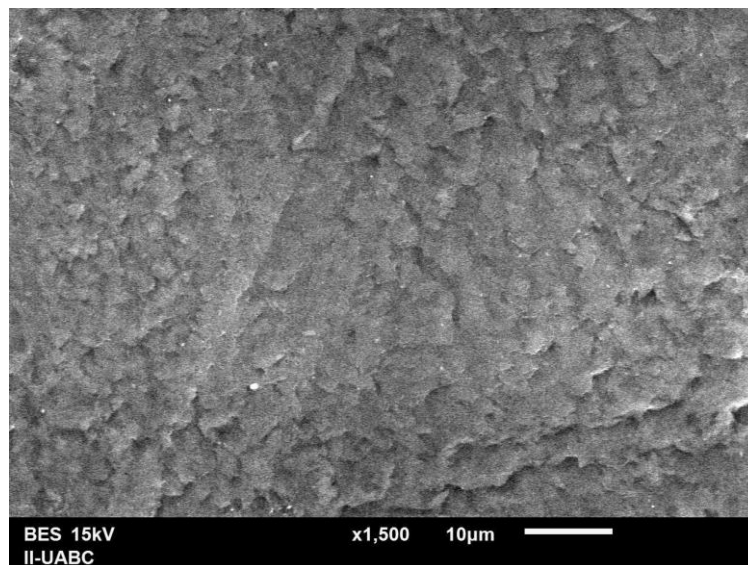


Fig. 15. Después de la extrusión.

Dando uso de la técnica nuevamente, se obtienen imágenes del grano del polímero luego de haber pasado por su ciclo completo de trabajo (**Fig. 15**). Estas imágenes permiten hacer una comparación directa entre el material nuevo y el material que ya ha sido sometido al proceso de impresión 3D, y lo que se observa es una notable similitud en cuanto a las características del grano, tanto en tamaño como en forma. Esta similitud nos da un primer indicio de que el proceso no ha causado una alteración significativa en la estructura física del material a nivel de grano, lo cual es un dato relevante para evaluar su potencial de reutilización.

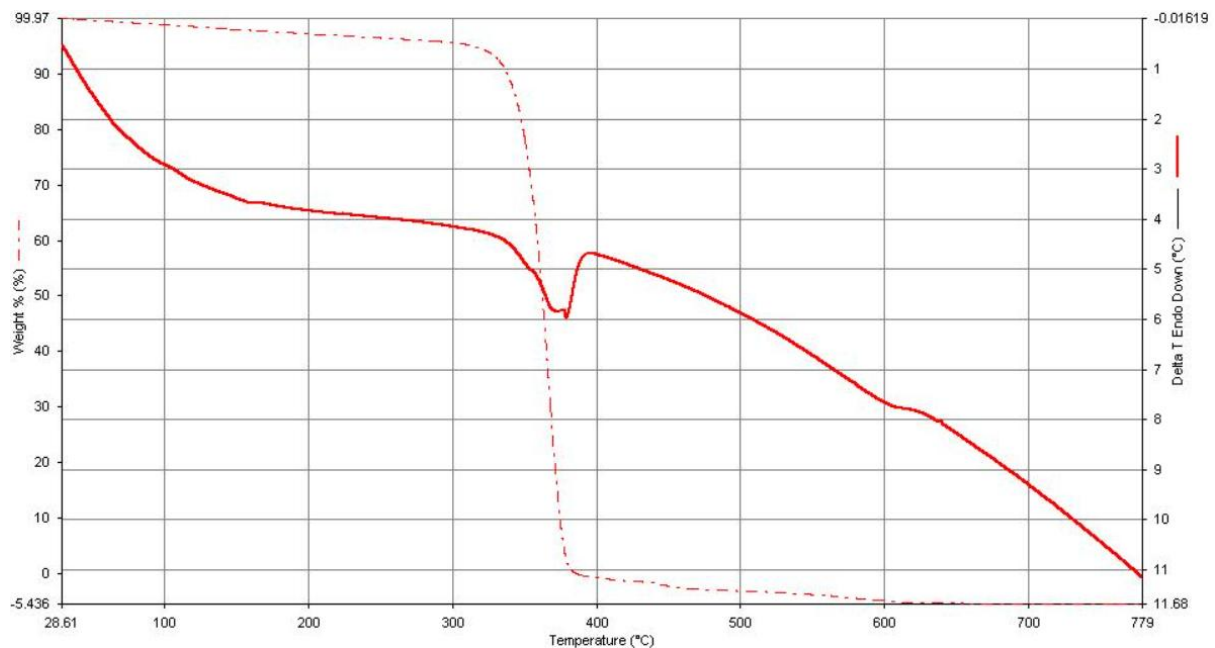
En base a estos resultados, se puede considerar que se presenta el primer resultado positivo en cuanto a la viabilidad del reformado del PLA. El hecho de que las características del grano se mantengan dentro de los parámetros del material nuevo sugiere que el PLA, aun después de haber sido procesado por la impresora

3D, no ha sufrido un nivel de degradación que comprometa su integridad física. Esto es especialmente importante al momento de considerar su reciclaje o reformado, ya que, si el tamaño del grano se mantuviera constante o dentro de un rango aceptable, el material puede seguir comportándose de forma estable en futuros procesos.

Al observar más de cerca las imágenes obtenidas, se nota una mayor presencia de granos con tamaños más cercanos al valor mínimo del rango establecido como referencia inicial. Esto puede deberse a una ligera fragmentación superficial o a una redistribución del material durante el proceso de impresión. Sin embargo, a pesar de esta tendencia hacia granos más pequeños, también se siguen encontrando partículas con tamaños que están perfectamente dentro del rango considerado como óptimo, e incluso en algunas áreas se detecta una concentración mayor de estos. Es decir, aunque se percibe una leve inclinación hacia tamaños menores, no se pierde la homogeneidad general del grano, lo que es un indicador favorable respecto a la calidad del material reciclado y su posible desempeño en una nueva impresión.

4.1.2 Pruebas Termogravimétricas (TGA)

4.1.2.1 Filamento sin uso



Gráfica 1. Termogravimetría PLA de carrete (Nuevo).

Dado el análisis termogravimétrico propuesto, se inicia el proceso con la evaluación de una muestra de material nuevo, con el objetivo de obtener un valor de referencia que permita comparar más adelante los resultados obtenidos con el material reformado. Esta primera medición es clave para establecer una base sólida desde la cual se puedan identificar las posibles variaciones en el comportamiento térmico entre ambos tipos de muestra.

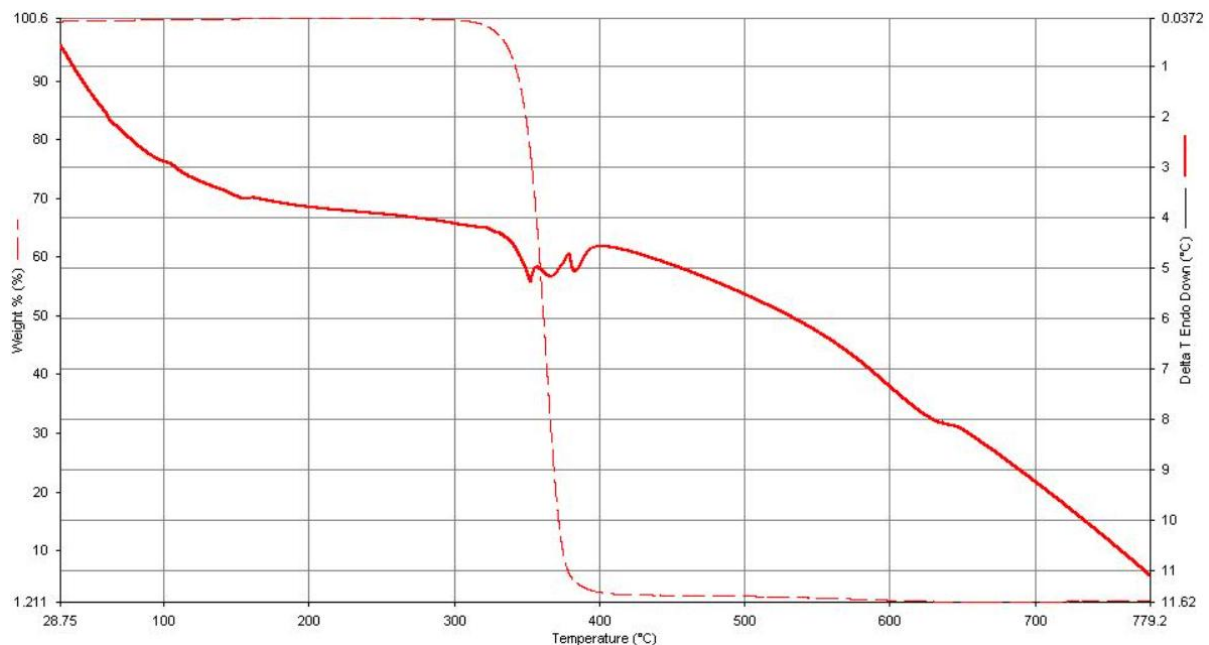
En la gráfica resultante (**Gráfica 1**), específicamente en la línea punteada de color azul, se puede observar claramente cómo se comporta la masa del material a medida que se incrementa la temperatura durante la prueba. A partir de aproximadamente los 330 grados centígrados, se detecta una pérdida constante de masa, lo que indica que el material comienza a experimentar un proceso de degradación térmica que continúa hasta alcanzar un punto final cercano a los 380 grados centígrados.

Esta pérdida progresiva de masa pone en evidencia el momento en que el material empieza a liberar o perder componentes que lo conforman, debido al efecto de la temperatura. A medida que la temperatura sigue aumentando, estos componentes volátiles se van desintegrando y eliminando, permaneciendo únicamente aquellos elementos que no se ven afectados o que resisten temperaturas más altas. Se observa además que el ensayo parte con una muestra de masa cercana a los 10 gramos, y que, al concluir la prueba, la mayor parte de esa masa ha sido eliminada, lo que confirma que la degradación ha sido prácticamente total dentro del rango térmico de la prueba.

Este comportamiento térmico nos permite confirmar que el material utilizado en impresoras 3D, procesado mediante tecnología de deposición fundida, trabaja a temperaturas bastante por debajo del umbral de degradación observado. Considerando que el proceso de impresión opera a temperaturas alrededor de los 200 grados centígrados, existe una diferencia de aproximadamente 130 grados respecto al punto donde comienza la pérdida significativa de masa. Esta diferencia de temperatura nos permite afirmar que el material tiene un margen térmico seguro durante el proceso de impresión y, por tanto, es viable pensar en su reformado.

Esto refuerza la posibilidad de reutilizar el material ya procesado para la elaboración de nuevos productos funcionales que puedan ser empleados nuevamente en impresoras 3D, sin comprometer su estabilidad térmica en las condiciones normales de operación.

4.1.2.2 Filamento 1 ciclo

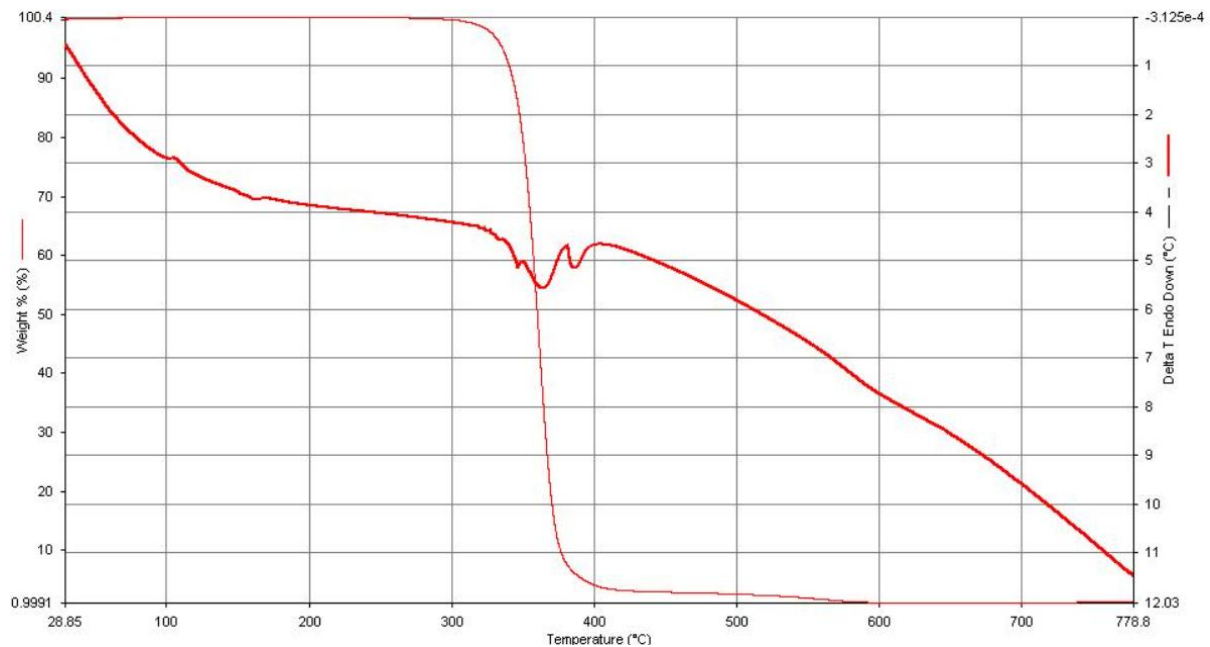


Gráfica 2. Termogravimetría PLA 1 ciclo de trabajo.

Se observa en el TGA (**Gráfica 2**) un comportamiento muy similar al registrado en la prueba realizada con material nuevo, lo cual resulta relevante al compararlo con esta evaluación efectuada sobre el material después de haber pasado por el extrusor de una máquina de impresión 3D. Esta similitud en el comportamiento indica que el material no presenta alteraciones significativas en sus propiedades tras el proceso de extrusión, manteniendo características térmicas y de respuesta comparables a las del PLA sin procesar.

Este resultado nos lleva a reafirmar la viabilidad del reformado del material, ya que demuestra que puede ser sometido nuevamente a ciclos térmicos sin una degradación crítica. La amplitud observada en los valores de temperatura de trabajo, así como la limitada pérdida de materia durante el proceso, respaldan la posibilidad de reutilizar este PLA reciclado dentro de rangos operativos aceptables para la manufactura aditiva, conservando un desempeño adecuado y consistente.

4.1.2.3 Filamento Reformado



Gráfica 3. Termogravimetría PLA Reformado.

Al realizar la tercera prueba de análisis térmico mediante TGA (Análisis Termogravimétrico) bajo condiciones controladas de temperatura (**Gráfica 3**), se puede observar un comportamiento diferenciado en el material reformado en comparación con el material nuevo. La gráfica resultante de esta prueba muestra una pérdida de masa progresiva, que, si bien es inferior a la del material nuevo, no representa una desviación drástica en su comportamiento térmico general. En términos específicos, se identifica una ligera disminución en la temperatura inicial en la que comienza la descomposición del material reformado.

Esta temperatura es aproximadamente 20 grados centígrados menor que la registrada para el material fabricado con filamento completamente nuevo. De esta manera, el proceso de degradación del material reformado se inicia alrededor de los 310 grados centígrados, en contraste con los 330 grados del material nuevo. No obstante, a pesar de esta diferencia inicial, el material reformado mantiene el mismo límite superior de estabilidad térmica observado en la prueba de referencia, alcanzando igualmente los 380 grados centígrados, lo que sugiere que conserva una parte importante de su resistencia térmica estructural.

4.1.3 Prueba de tensión superficial (WCA)

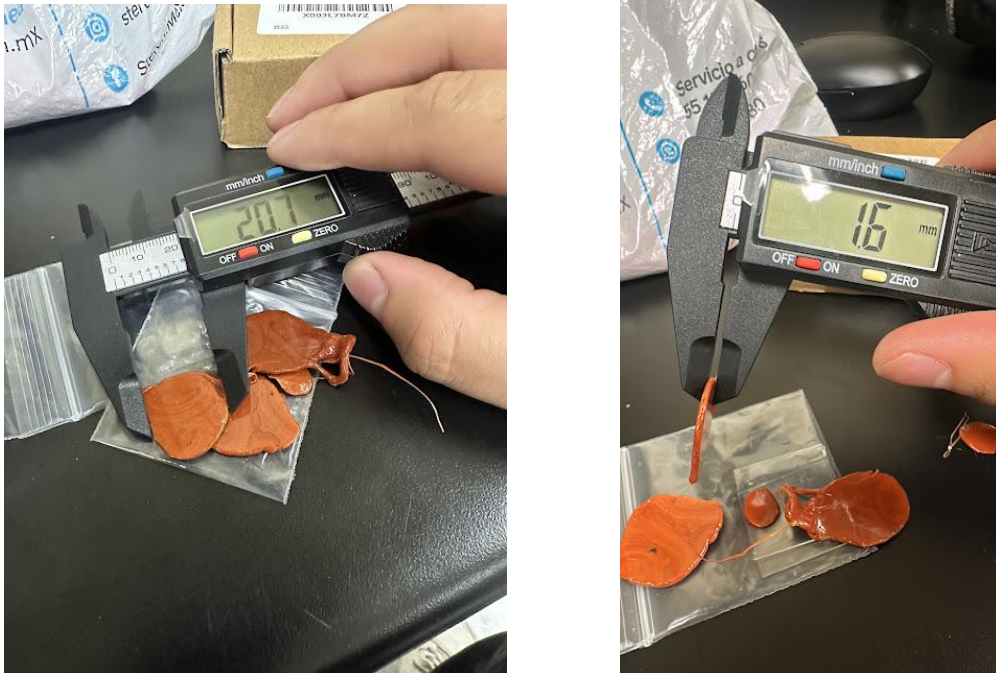


Fig. 16 y 17. Placa de material para pruebas de tensión superficial.

Se genera una muestra del material reformado proveniente del proceso de recuperación de residuos de impresión 3D, con el objetivo de evaluar sus propiedades de humectabilidad mediante la técnica de análisis de tensión superficial por contacto con agua. Para ello, se procede a extruir el material previamente triturado y procesado directamente sobre una superficie plana de vidrio, aprovechando su capacidad de enfriamiento y su textura lisa, lo cual facilita la obtención de una base uniforme (**Fig. 16 y 17**).

Una vez depositado el material en estado semiviscoso sobre la placa, se realiza un procedimiento de compresión controlada utilizando una segunda placa de vidrio, buscando generar una distribución homogénea del polímero y así obtener una muestra con espesor reducido y superficie completamente plana. Este formato es esencial para asegurar que la prueba de contacto posterior no se vea afectada por irregularidades físicas que alteren el ángulo de contacto de la gota de agua.

La muestra obtenida mediante este proceso sirve como base para determinar el comportamiento hidrofílico o hidrofóbico del material reformado, así como la posible

aparición de porosidades o microgrietas resultantes del proceso de reciclado. Este análisis permite establecer primeras observaciones cualitativas respecto a la integridad superficial del polímero después de su ciclo de vida inicial, proporcionando datos clave sobre su potencial de reutilización.

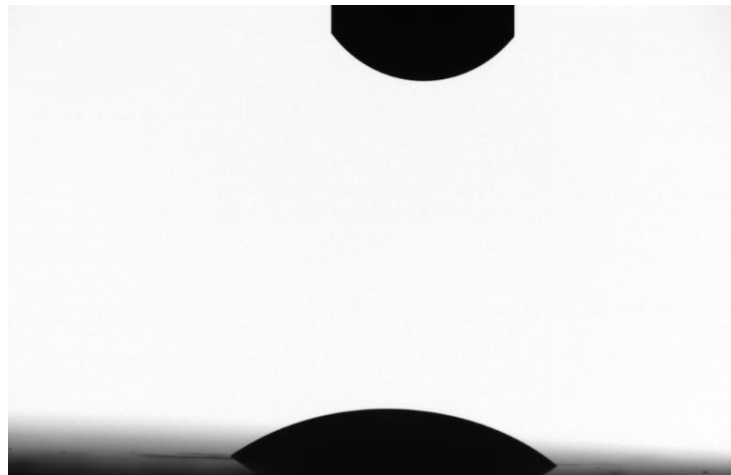


Fig. 18 WCA PLA reformado.

En la **Fig. 18** podemos observar la gota de agua depositada sobre el material y es destacable el comportamiento que presenta sobre el polímero, por lo que obtener el ángulo resultante dada la tangente que interseca el primer punto de curvatura, desde el inicio de la gota del lado izquierdo.

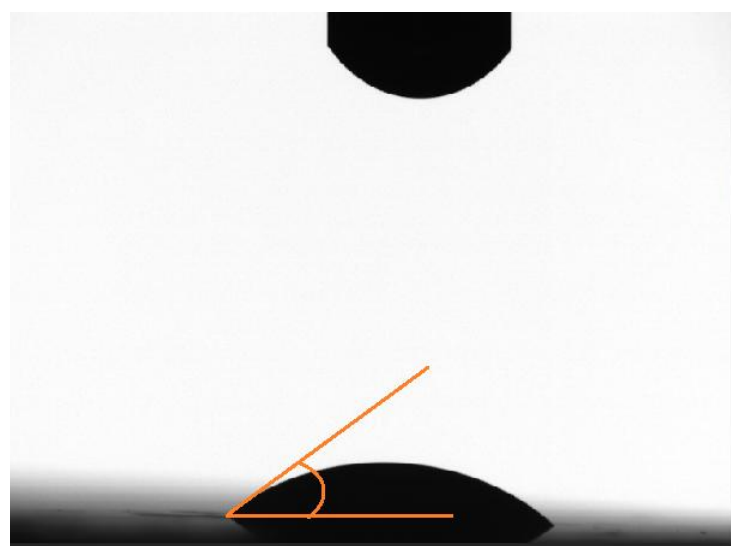


Fig. 19. Ángulo de contacto.

Dado que el ángulo de contacto obtenido en la prueba ronda los 30 grados (**Fig. 19**), se puede establecer que la adherencia del agua sobre la superficie del polímero reformado es considerablemente alta. Esto se debe a que, en términos generales, cuando el ángulo de contacto entre un líquido y un sólido es menor a 90° , se interpreta que existe una fuerte interacción entre ambos materiales, lo que provoca que el líquido tienda a extenderse sobre la superficie. Este fenómeno es característico de las superficies hidrofílicas, en las cuales las moléculas del líquido en este caso, el agua, son atraídas por la superficie del polímero, disminuyendo la tensión interfacial y facilitando su dispersión.

En el contexto de este estudio, este comportamiento indica que el material reformado conserva una buena afinidad superficial con el agua, lo que podría relacionarse con un bajo nivel de porosidad superficial o con la presencia de grupos funcionales polares en la estructura del PLA reciclado, que favorecen esta interacción.

4.1.4 Triturado fase 1

Dada la inviabilidad técnica y económica de fabricar, en el momento actual, una máquina trituradora especializada para polímeros, se tomó la decisión de alcanzar el objetivo de triturado del material utilizando métodos más accesibles y menos robustos, adaptando recursos disponibles con herramientas de uso común como primera fase. Para ello, se utilizó el motor de una procesadora de alimentos en conjunto con un vaso metálico adaptado a las cuchillas, lo cual permite generar un sistema funcional para la fragmentación mecánica de los distintos residuos derivados de la impresión 3D. Esta solución, aunque improvisada, cumple con los requerimientos básicos del proceso al ofrecer una fuerza de corte suficiente para materiales con dureza baja a media.

El procedimiento de triturado se inicia específicamente con los residuos identificados anteriormente en los puntos 1 y 3 de la metodología, los cuales corresponden a los soportes de impresión 3D, que generalmente son estructuras ligeras y quebradizas, y a las aglomeraciones de material causadas por falta de adherencia o extrusión en vacío por parte de la impresora. Ambos tipos de desperdicio

presentan una estructura relativamente más sencilla de descomponer en comparación con piezas sólidas o diseños fallidos de mayor volumen.



Fig. 20. Material triturado.

En la **Fig. 20**, se observa el resultado obtenido tras el procesado de los desechos de PLA, los cuales provienen de diferentes sesiones de impresión y presentan variaciones en el color. Estos materiales han sido recolectados a lo largo del tiempo y cuidadosamente clasificados según su composición, con el fin de evitar la mezcla de polímeros diferentes que puedan alterar los resultados fisicoquímicos del material reformado. La segregación por tipo de polímero es clave para mantener la consistencia de las pruebas y garantizar que cualquier cambio observado se deba al proceso de reformado, y no a la contaminación cruzada de materiales.

El proceso de trituración se repite las veces que sean necesarias, hasta lograr reducir el tamaño de las partículas a dimensiones menores a los 7 mm de espesor, tomando como referencia el promedio de tamaño utilizado comercialmente para los pellets de polímero nuevo, empleados en la fabricación de filamento para impresión 3D. Este criterio de tamaño garantiza que el material triturado pueda ser procesado posteriormente de manera similar al pellet virgen, sin requerir ajustes mayores en los sistemas de extrusión o fusión utilizados en impresoras o reformadoras.

Los pellets suelen tener forma tubular. Su tamaño promedio es de unos 2 mm de diámetro y 6 mm de longitud. Sin embargo, también se pueden procesar en

tamaños más anchos (hasta 5 mm) y más largos (hasta 10 mm). Si bien también se pueden procesar en tamaños más pequeños, el procesamiento se vuelve complicado cuando los pellets son demasiado pequeños. (CEAD, 2021)

4.1.5 Tamizado



Fig. 21. Material sobre malla como filtro.

Una vez finalizado el proceso de trituración del material, se procedió a realizar un filtrado mediante una malla metálica que cuenta con una apertura de 5 mm (**Fig. 21**), seleccionada específicamente para asegurar que únicamente las partículas con dimensiones adecuadas continúen al siguiente paso del proceso: la extrusión. Esta etapa es fundamental para garantizar un flujo constante y libre de obstrucciones en el sistema de extrusión, ya que el paso de partículas de gran tamaño podría ocasionar atascos, fluctuaciones en el caudal del material o incluso daños en el equipo.

Durante este filtrado, todo el material que no logra atravesar la malla metálica se recolecta nuevamente y se somete otra vez al proceso de trituración, con el objetivo de reducir sus dimensiones hasta alcanzar el tamaño deseado. Este procedimiento se repite tantas veces como sea necesario hasta que la totalidad del material procesado cumpla con los criterios establecidos.

Cabe destacar que, en ciertos casos, algunas virutas logran pasar a través de la malla a pesar de tener una de sus longitudes ligeramente superior al estándar deseado. Esta situación ocurre principalmente con residuos que provienen de material extruido al aire, ya que, durante este tipo de fallas en la impresión, el PLA forma filamentos alargados y delgados, con diámetros que rondan los 0.5 mm, pero con

longitudes mayores que las del resto de los fragmentos. Al ser estructuras delgadas, logran pasar por las aberturas de la malla a pesar de su extensión, sin representar un riesgo significativo para el flujo, ya que su forma lineal y delgada no genera bloqueos en el sistema.

Esta etapa de filtrado y retriturado garantiza una uniformidad granulométrica mínima en el material de entrada, lo cual es clave para la eficiencia del proceso de reformado, especialmente en aplicaciones como la extrusión de filamento, donde las dimensiones del insumo afectan directamente la calidad del producto final.

4.1.6 Extruido



Fig. 22. Material en tolva de alimentación.

Una vez verificado que el material triturado (**Fig. 22**) cumple con las dimensiones adecuadas, es decir, que es lo suficientemente pequeño para evitar atascos y permitir un flujo continuo, se procede a su introducción en la sección de alimentación de la máquina extrusora. Esta etapa es crítica, ya que la eficiencia del proceso depende directamente de la capacidad del material para desplazarse de manera constante a través del sinfín de alimentación.

Para asegurar un funcionamiento óptimo, se tiene especial cuidado en no sobrecargar la tolva o sistema de alimentación, permitiendo así que el material pueda agitarse manualmente durante la operación. Esta agitación manual se vuelve necesaria debido a que, al tratarse de fragmentos con una gran variedad de formas y tamaños, existe una alta tendencia a que el material se asiente en la base de la tolva, formando cavidades o vacíos que impiden el descenso natural del polímero hacia el tornillo sin fin.

Esta condición puede provocar interrupciones en el suministro de material, afectando tanto la presión interna del sistema como la calidad del producto extruido. Por ello, se implementa un sistema de supervisión constante y, en caso de ser necesario, se realiza la redistribución manual del material en la tolva, asegurando que las partículas de PLA sean constantemente suministradas a la extrusora sin generar bloqueos ni vacíos. Esta práctica sencilla pero efectiva, permite mantener el flujo del material y garantiza la homogeneidad en la alimentación, lo que es fundamental para obtener un resultado estable y reproducible durante el reformado del filamento.

4.1.6.1 Extruido 200 C



Fig. 23. Máquina de extrusión.

Tomando como base las temperaturas de trabajo comunes del ácido poliláctico (PLA) en procesos de manufactura aditiva, se establece como primer parámetro de prueba una temperatura inicial de 200 °C en el extrusor, valor considerado estándar en impresoras 3D del tipo FDM. A partir de esta configuración térmica, se procede a activar el motor del sistema extrusor en su velocidad mínima, esto con el objetivo de evaluar el comportamiento del equipo y del material bajo condiciones controladas (**Fig. 23**). El enfoque principal de esta etapa es verificar que el motor no se vea forzado o comprometido por un exceso de suministro de material en combinación con una temperatura que, aunque funcional en impresoras 3D, puede no ser suficiente para las condiciones particulares del reformado.

Durante esta primera prueba, se observa como resultado una porción de material parcialmente fundido, con una tonalidad cobriza o anaranjada, que no logra adoptar la forma de filamento uniforme. Al establecer una temperatura inicial de 200 °C en el sistema de extrusión, se registró un flujo irregular del material, el cual no permitió la formación de un filamento continuo. El material extruido presentó aglomeraciones y falta de cohesión, lo que indicó que esta condición térmica no era adecuada para el proceso de reformado bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Esta respuesta térmica evidencia que, aunque 200 °C resulta efectiva en impresión 3D, donde el material fundido es depositado rápidamente y en volúmenes pequeños, las condiciones en el experimento difieren significativamente. En este caso, la extrusora trabaja con un suministro de material inconstante, lo que modifica el flujo y al presentar una temperatura en la que el material fluye fácilmente, no le permite generar un material uniforme y constante. Por lo tanto, se concluye que la temperatura comúnmente empleada en impresoras 3D no es aplicable directamente al proceso de reformado con alimentación continua, y será necesario ajustar los parámetros térmicos para alcanzar una extrusión estable y funcional.

4.1.6.2 Problemas de flujo



Fig. 24. Aglomerado de material extruido.

A continuación, se llevan a cabo una serie de pruebas experimentales de temperatura y flujo, con el objetivo de identificar el punto óptimo de trabajo para el material reformado. Para ello, se realiza un ajuste progresivo de la temperatura del extrusor, reduciendo 10 grados centígrados por iteración, partiendo desde el valor inicial de 200 °C. Esta estrategia permite observar de forma controlada cómo responde el polímero ante diferentes condiciones térmicas, buscando alcanzar un flujo de salida continuo y uniforme que sea susceptible de ser moldeado en forma de filamento.

Durante cada una de estas pruebas, se aplica una fuerza de elongación constante sobre el material extruido, simulando el estiramiento que ocurre en procesos convencionales de fabricación de filamento. El propósito principal de esta fuerza es garantizar que el material fundido adquiriera una forma cilíndrica homogénea, con un diámetro consistente a lo largo de toda la extrusión. Este parámetro es crucial, ya que influye directamente en la funcionalidad del filamento para su posterior uso en impresoras 3D (**Fig. 24**).

Mediante este enfoque sistemático, se busca identificar no solo la temperatura más adecuada, sino también el rango térmico que ofrece mayor estabilidad en el flujo del polímero, asegurando que el material reformado pueda ser procesado de manera confiable. La evaluación visual del comportamiento del filamento extruido, así como

su capacidad para mantener un diámetro constante durante el enfriamiento, permiten definir las condiciones ideales para la generación de un producto reutilizable con características similares al material original.

4.1.6.3 Ajuste temperatura final fase 1 150 grados centígrados



Fig. 25. Extrusora temperatura fijada 150.

Finalmente, tras una serie de pruebas descendentes en temperatura, se logra alcanzar un punto de trabajo favorable a los 150 grados centígrados (**Fig. 25**), temperatura que se muestra como la más adecuada dentro del rango evaluado. A este valor térmico, el material reformado adquiere una viscosidad suficiente para mantener su cohesión y, al mismo tiempo, permite un flujo continuo y uniforme cuando se le aplica una fuerza de elongación externa. Esta condición resulta esencial, ya que posibilita la formación de un filamento estable, sin que se presenten rupturas, aglomeraciones o pérdida de material durante la extrusión.

Si bien el filamento obtenido en esta etapa aún presenta una medida de diámetro variable y no controlable con precisión, representa un avance significativo dentro del proceso de reformado del PLA. En este experimento se logró una extrusión sostenida que mantiene la forma cilíndrica deseada, lo que constituye uno de los primeros resultados positivos y tangibles de la investigación experimental aquí planteada.

A partir de este punto, surgen nuevos cuestionamientos respecto a los parámetros de control que deberán implementarse para homogeneizar el producto final y cumplir con los estándares dimensionales establecidos para los filamentos de impresión 3D, los cuales suelen requerir tolerancias estrictas en cuanto al diámetro, generalmente de ± 0.05 mm. Este hallazgo marca el inicio de una nueva fase en la investigación, enfocada en la optimización del sistema de estiramiento, control térmico y velocidad de extrusión, elementos clave para garantizar que el filamento reformado pueda ser considerado viable tanto técnica como comercialmente.

4.1.6.4 Primer filamento reformado



Fig. 26. Rollo de filamento reformado.

Se observa en la **Fig. 26** el resultado del procesado del material previamente triturado, el cual, tras ser alimentado en la extrusora y sometido a una fuerza externa de elongación, adopta exitosamente la forma de un filamento continuo. Este filamento, al ser guiado de manera manual, se mantiene bajo una elongación constante, lo que favorece la obtención de una geometría más estable. Para facilitar su manipulación y almacenamiento, se hace uso de un carrete vacío, que permite mantener el filamento en tensión controlada mientras fluye desde la boquilla de la extrusora. De esta manera, se consigue una cantidad considerable de material reutilizado, lo cual representa un avance tangible en el proceso de recuperación del PLA postconsumo.

No obstante, durante esta etapa se identifican problemas asociados al proceso de enfriamiento del material, los cuales afectan la calidad final del filamento. Se observa que, debido a que el PLA sale del extrusor a temperaturas elevadas —en el orden de los 150 °C o más, según las pruebas anteriores—, el breve intervalo de tiempo y espacio entre la salida del extrusor y su enrollado en el carrete resulta insuficiente para su correcta solidificación. Como consecuencia, el filamento aún en estado semisólido tiende a adherirse a las capas previamente depositadas en el carrete, lo que provoca deformaciones en su forma y compromete la uniformidad del enrollado.

Este fenómeno pone en evidencia la necesidad de incorporar un sistema de enfriamiento posterior a la extrusión, como corrientes de aire dirigidas o baños de agua, que permita estabilizar el filamento térmicamente antes de su manipulación. Este tipo de ajustes será esencial para mejorar la calidad del producto final y garantizar su compatibilidad con las exigencias técnicas de las impresoras 3D.

4.1.6.5 Variaciones en diámetro



Figuras 27 y 28. Valores máximos y mínimos de filamento reformado.

Dada la variabilidad en la fuerza de elongación aplicada al filamento durante el proceso de extrusión, principalmente por tratarse de un procedimiento realizado de manera manual y sin un sistema automatizado de tracción, se evidencia una notable fluctuación en el diámetro del material obtenido (**Fig. 27 y 28**). Esta falta de control mecánico provoca que el filamento extruido experimente zonas de estiramiento excesivo, lo que conlleva a la formación de segmentos con diámetros por debajo del mínimo requerido.

En particular, se registran valores mínimos de hasta 0.4 mm de diámetro, los cuales son inadecuados para su uso en impresoras 3D. Este diámetro tan reducido compromete la funcionalidad del sistema de alimentación de filamento, ya que los motores de empuje de las impresoras FDM no logran aplicar la presión necesaria sobre un material tan delgado para transportarlo correctamente a través del extrusor. Además, se generan acumulaciones de filamento en ciertas zonas del carrete, que derivan en atascos y discontinuidades en el suministro, dificultando la continuidad del proceso de impresión.

Estos resultados subrayan la necesidad crítica de implementar un sistema de control de tracción y velocidad constante en el proceso de extrusión, que permita mantener un diámetro uniforme y dentro de los estándares establecidos, según TAICED (2021) “El Filamento puede encontrarse en dos configuraciones: de 1.75mm y 3mm o 2.85mm de diámetro.” pero se selecciona el de 1.75mm por los requerimientos de la impresora Creality Ender 3 que forma parte del inventario de máquinas del laboratorio.

4.1.7 Triturado fase 2

4.1.7.1 Trituradora industrial

En la **Fig. 29**, se muestra en sistema de triturado comercial y la tecnología de navajas (**Fig. 30**) que se adquirió para ser utilizado en el presente proyecto. Con este sistema, la fase experimental de triturado se espera tenga un mayor control y homogeneidad. En la **Fig. 31**, puede observarse el tipo de malla con el que cuenta el sistema, lo que permite mantener un control de tamizaje adecuado para el posprocesamiento del material una vez triturado considerando el tipo de aplicación o uso que pueda darse a éste.



Figura 29. Máquina trituradora y Figura 30. Navajas de la misma trituradora.

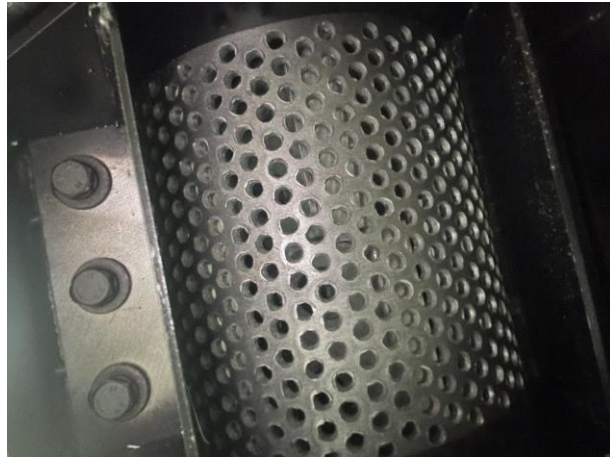


Fig. 31. Malla filtrante de pellets.

4.1.7.2 Limpieza



Figura 32 y 33. Navajas antes y después de la limpieza.

Antes de encender la máquina y proceder a agregar el material destinado a la molienda (**Fig. 32**), se lleva a cabo una limpieza exhaustiva en cada una de las secciones donde se encuentran las navajas (**Fig. 33**). Este proceso incluye retirar cualquier residuo adherido y asegurarse de que no queden partículas atrapadas entre los bordes cortantes. Del mismo modo, se limpia cuidadosamente el filtro de partículas ubicado en la parte inferior del equipo, ya que este suele acumular restos finos de moliendas anteriores.

Esta limpieza previa es fundamental para evitar cualquier tipo de contaminación del PLA, especialmente si la máquina ha sido utilizada anteriormente con materiales de composición distinta. Incluso pequeñas trazas de otro polímero podrían alterar el comportamiento del material procesado, modificar sus propiedades y afectar tanto la calidad del filamento resultante como su desempeño posterior en la impresora 3D. Por ello, garantizar que todo el sistema se encuentre completamente libre de residuos es un paso indispensable antes de iniciar cada ciclo de molienda.

4.1.7.3 Proceso de triturado

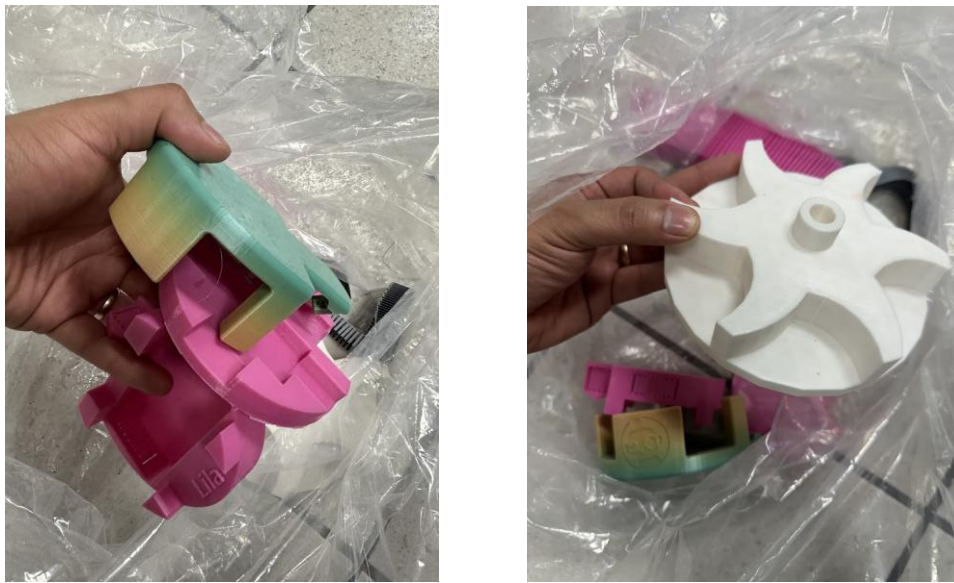


Fig. 34 y 35. Impresiones 3D con errores y sin utilidad.

Se inicia el proceso de triturado utilizando maquinaria industrial, lo que permite trabajar con un tipo de material que no podía ser reciclado mediante el método previamente descrito. En esta etapa se emplean impresiones erróneas, piezas desechadas o componentes que simplemente ya no tienen un uso funcional (**Fig. 34 y 35**). Muchas de estas piezas cuentan con rellenos variables, pero poseen paredes sólidas y estructuras internas que les otorgan una dureza considerable, volviéndolas imposibles de procesar adecuadamente con equipos de menor capacidad.

Gracias a la maquinaria industrial, es posible descomponer este tipo de material en partículas manejables y uniformes, permitiendo así recuperarlo para su

reutilización. Este paso representa una ventaja significativa en la cadena de reciclaje, ya que amplía el tipo de piezas que pueden reintegrarse al proceso y evita que materiales más rígidos terminen descartados sin aprovechamiento.



Fig 36. Pesaje en báscula de material a triturar.

En esta primera etapa de molienda utilizando maquinaria robusta, se introduce una carga inicial de 0.85 lb (**Fig. 36**), lo que equivale aproximadamente a 385 gramos de material. Esta cantidad fue seleccionada como punto de partida para evaluar el desempeño de la máquina bajo una carga moderada y constante. Es importante señalar que todo el material empleado en esta fase corresponde, con total certeza, a ácido poliláctico (PLA), lo cual garantiza que los resultados obtenidos no se vean afectados por mezclas accidentales con otros polímeros.

El uso de un material cuya composición está plenamente identificada resulta fundamental para establecer parámetros de referencia confiables. De esta manera, cualquier variación en densidad, textura, comportamiento térmico o velocidad de molienda puede relacionarse directamente con el proceso y no con posibles diferencias en las propiedades químicas del material.



Fig. 37 y 38. Material introducido a la máquina y molienda obtenida.

En la **Fig. 37** se observa el proceso en el que se introducen las distintas variedades de material destinadas a la molienda. Dentro de esta selección se incluyen piezas con una dureza relativamente baja, como los soportes generados durante la impresión, así como componentes con paredes sólidas y mayor resistencia, los cuales representan un reto adicional que no cualquier máquina es capaz de triturar de manera eficiente. Este contraste en la dureza del material permite evaluar la capacidad real del equipo para trabajar con diferentes geometrías y espesores sin comprometer su funcionamiento.

Una vez completada la etapa de trituración (**Fig. 38**), se aprecia el producto resultante de la molienda: un material fragmentado de tamaño uniforme y adecuado para su posterior procesamiento. Esta homogeneidad es esencial para garantizar un flujo constante en etapas posteriores, como la extrusión del filamento, ya que reduce el riesgo de atascos o irregularidades durante la alimentación del material.



Fig. 39. Material resultante de la molienda.

En conjunto con esta primera molienda, también se llevó a cabo un proceso adicional utilizando el material recolectado de fuentes externas (**Fig. 39**). Dicho material incluía piezas con modelos erróneos, soportes descartados y diseños que ya habían cumplido su propósito, por lo que no representaban ningún uso práctico más allá de su reciclaje mediante molienda.

Durante este procedimiento se realizaron mediciones específicas para determinar el tiempo que la máquina tarda en procesar el material. A partir de estas pruebas se obtuvo un valor aproximado de 64 gramos por minuto. Sin embargo, es importante señalar que, debido al desconocimiento inicial sobre la capacidad real de la máquina, el material se fue alimentando de manera controlada y gradual. Esto se hizo con el fin de evitar sobrecargas, pero a la vez pudo introducir un sesgo en la medición final de la velocidad de molienda, ya que la máquina no operó en todo momento en un flujo completamente continuo.

De forma complementaria al registro de la velocidad, también se realizó un seguimiento de las temperaturas alcanzadas por la máquina. Esto se consideró necesario para prevenir incrementos térmicos excesivos que pudieran alterar el

desempeño del equipo o añadieran un nuevo ciclo térmico al material, afectando así los resultados. Las mediciones indicaron una variación de 57 grados con respecto a la temperatura en reposo: la máquina iniciaba a 28 °C y alcanzó aproximadamente 85 °C al finalizar la etapa de molienda.

4.1.7.4 Medición de tamaño de pellet o grano de molienda

Para obtener un tamaño de grano o pellet adecuado, se toma como referencia la medida estándar descrita por CIAD (2021), la cual establece que estos pellets suelen presentarse en forma cilíndrica y con dimensiones relativamente uniformes. De acuerdo con dicha referencia, es común encontrarlos con un diámetro cercano a los 2 mm y una longitud aproximada de 6 mm. Estas dimensiones permiten calcular un área transversal de alrededor de 3.14 mm² y un volumen aproximado de 19 mm³ por pellet.

Contar con esta guía resulta fundamental, ya que proporciona un parámetro claro para comparar el material obtenido durante la molienda con los estándares utilizados en procesos industriales. Además, asegurar un tamaño de pellet dentro de estos valores facilita un flujo más estable durante la extrusión, evitando atascos y garantizando una alimentación homogénea del material en las etapas posteriores del reciclaje y la fabricación del filamento.

Tabla 1. Área y volumen molienda licuadora.

Molienda licuadora	Datos
Muestra (3.2gr)	
Área (mm ²)	Volumen (mm ³)
4.72	1.888
3.96	3.168
8.64	2.592
8	3.2
8.25	4.95
10.24	4.096
8.24	3.296
9.72	3.888
4.26	3.408

7.98	3.192
Promedio	
7.401	3.3678

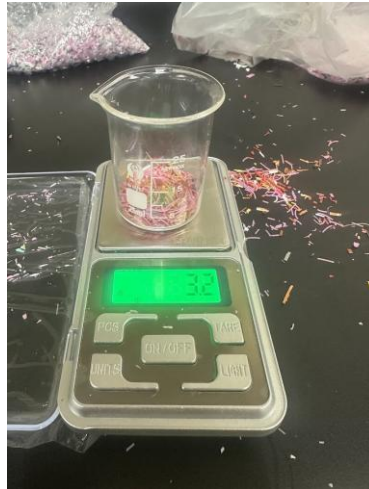


Figura 40. Peso molienda 1 en volumen de 5 ml.

En la primera molienda se observan variaciones muy marcadas entre las diferentes partículas obtenidas, lo cual era de esperarse considerando el procedimiento utilizado para llegar a este tipo de grano. Al emplear instrumentos que no están diseñados ni optimizados para procesos de trituración de materiales plásticos como lo es una licuadora doméstica, el resultado final presenta partículas con longitudes, formas y geometrías muy diversas. Esto se debe a que las aspas de la licuadora no realizan un corte controlado ni uniforme, sino que fragmentan el material de manera aleatoria conforme este se desplaza dentro del recipiente.

A pesar de estas limitaciones, el tamizado realizado posterior a la molienda permitió obtener un conjunto de partículas cuyo tamaño se ubica considerablemente por debajo del promedio de un pellet convencional. En promedio, se registraron volúmenes cercanos a los 3 mm^3 , lo cual, aunque menor de lo ideal, resultó suficiente para permitir el inicio del proceso de extrusión. Este tamaño reducido facilita un flujo más constante dentro del extrusor y evita, en gran medida, bloqueos que podrían presentarse si las partículas fueran demasiado grandes o irregulares.

Para llevar un control más preciso sobre las diferencias de gramaje entre las distintas muestras obtenidas en cada etapa de molienda, se emplea un vaso

graduado con una capacidad marcada en 5 ml. Este recipiente sirve como referencia estandarizada, permitiendo comparar de forma consistente el peso correspondiente a un mismo volumen de material triturado. Al utilizar este método, se logra identificar de manera clara la densidad aparente del grano resultante y se facilita la comparación directa entre moliendas realizadas con distintos equipos o procedimientos.

En esta primera medición, al llenar el vaso de 5 ml con material correspondiente a la primera molienda, se obtiene un valor de 3.2 gramos (**Fig. 40**). Este resultado no solo refleja las características propias del tamaño y forma de las partículas obtenidas, sino que también sirve como punto de partida para evaluar la eficiencia de los métodos de triturado utilizados posteriormente. Con esta medición inicial se construye una referencia que permitirá analizar cómo las diferencias en equipo, granulometría y homogeneidad influyen en la densidad final del material procesado.

Tabla 2. Área y volumen segunda molienda.

Segunda molienda	Datos
Muestra (2.9gr)	
Área (mm ²)	Volumen (mm ³)
21.76	50.048
12.87	7.722
11.21	4.484
21.46	34.33
12.47	13.717
24.08	21.672
10.85	28.21
14.19	12.771
4.25	5.525
8.88	15.096
Promedio	
14.202	19.3575



Fig. 41. Peso molienda 2 en volumen de 5 ml.

En esta segunda molienda se emplea una herramienta de trituración diseñada específicamente para el procesamiento de materiales plásticos, lo que permite obtener granos con una forma considerablemente más homogénea y con dimensiones mucho más cercanas al estándar de 19 mm^3 de volumen, valor que se toma como referencia para el tamaño ideal de pellet en procesos de extrusión. Esta mejora en la regularidad del material representa un avance significativo respecto a la primera molienda, donde las partículas eran irregulares debido al uso de equipo no especializado.

Desde el inicio del suministro del material hasta el término total del proceso, la máquina tardó exactamente 48.47 segundos en triturar por completo las piezas sólidas introducidas. A diferencia de la primera etapa, en esta ocasión no se trabajó únicamente con soportes o con filamento extruido accidentalmente por fallas de adhesión en la cama de impresión; aquí se procesaron piezas sólidas y de alta dureza. A pesar de su resistencia, estas no representaron ningún obstáculo para la trituradora industrial, demostrando la capacidad del equipo para manejar materiales compactos y estructuralmente más robustos.

Al realizar nuevamente la medición en el vaso graduado de 5 ml, se obtiene un peso final de 2.9 gramos (**Fig. 41**), lo que representa una diferencia de 0.3 gramos menos en comparación con la muestra proveniente de la molienda realizada en

licuadora. Esta disminución se debe a que en esta ocasión no se aplicó un proceso de tamizado, ya que el tamaño promedio de los pellets obtenidos ronda los 19 mm³, cumpliendo adecuadamente con las condiciones deseadas para su uso en el extrusor. Su uniformidad y cercanía al tamaño estándar permiten una alimentación estable del material sin necesidad de filtrados adicionales.

Tabla 3. Área y volumen tercera molienda.

Tercera molienda	Datos
Muestra (3.6gr)	
Área (mm ²)	Volumen (mm ³)
14.72	20.608
4.76	5.236
11.9	4.76
1.87	2.431
6.82	8.866
12.74	5.096
3.6	5.76
7	8.4
8.64	3.456
2.85	2.28
Promedio	
7.49	6.6893

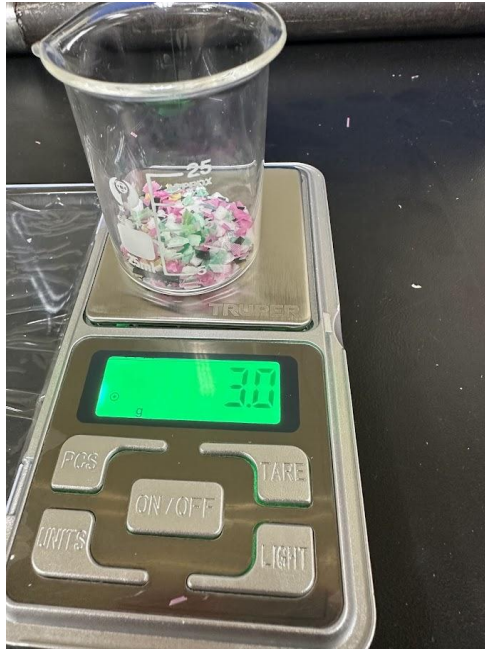


Fig. 42. Peso molienda 3 en volumen de 5 ml.

Esta molienda corresponde a la primera molienda realizada en la trituradora industrial, con la diferencia de que el material obtenido inicialmente fue reintroducido nuevamente en la máquina, es decir se clasifica como la tercera molienda. El propósito de este procedimiento adicional era analizar los cambios que experimentarían los pellets tras un segundo ciclo de trituración, evaluando si este paso podría resultar beneficioso o si, por el contrario, afectaría negativamente su tamaño y consistencia.

Esta segunda molienda se llevó a cabo antes de realizar la medición formal del tamaño del grano, cuando aún no era posible descartar o justificar la necesidad de repetir el proceso. Como resultado, se obtuvieron partículas con un volumen promedio de 6.68 mm^3 , un valor claramente inferior al mínimo requerido para garantizar un adecuado comportamiento durante la extrusión. Esta reducción significativa en el tamaño del pellet permite descartar, de manera evidente, la utilidad de realizar una doble molienda, ya que provoca una granulometría demasiado fina que comprometería el flujo dentro del extrusor.

En cuanto a las mediciones realizadas en el vaso graduado de 5 ml, se registró un peso de 3.0 gramos (**Fig. 42**), es decir, 0.1 gramos más que en el procedimiento previo. Este incremento se explica por el mejor acomodo de las partículas más

pequeñas dentro del recipiente, lo que permite una mayor cantidad de material por volumen y reduce la presencia de espacios vacíos entre los pellets. Aunque este aumento en densidad aparente puede parecer beneficioso, en realidad evidencia un tamaño de grano demasiado reducido para un procesamiento estable en la extrusión.

4.1.7.5 Segundo filamento reformado



Fig. 43. Cambios temperatura extrusión graduales.

Se ajustaron los parámetros de temperatura (**Fig. 43**) con el propósito de corregir la deformación del material ocasionada por su comportamiento casi líquido durante el proceso. Para lograrlo, se realizaron reducciones graduales de temperatura en esta ocasión en intervalos más pequeños, de 5 grados específicamente, evitando así hacer ajustes demasiado bruscos que pudieran comprometer el funcionamiento del equipo. Esta estrategia también permitió prevenir la generación de esfuerzos excesivos en el motor, los cuales podrían presentarse si el material se enfriaba demasiado repentinamente y aumentaba su resistencia al ser empujado.

Tras varias pruebas y ajustes progresivos, se determinó que una temperatura de 130 grados ofrecía un comportamiento considerablemente más estable y manejable. Bajo este valor, el material fluye con mayor regularidad y permite obtener un filamento dentro de un rango considerado adecuado para su uso en una impresora 3D. Con ello se minimizan riesgos de atascos, fallas en la extrusión o inconsistencias en el flujo, problemas comunes cuando el filamento no se encuentra lo suficientemente estandarizado para un uso continuo y confiable.



Fig. 44. Material triturado de donación.

Se suministra a la máquina el material previamente triturado, el cual proviene de distintas áreas dentro de la misma institución y que fue donado específicamente para apoyar el proceso de reciclaje de materiales de impresión 3D (**Fig. 44**). Para garantizar la homogeneidad del estudio, se solicita exclusivamente material correspondiente a PLA, evitando así cualquier mezcla accidental con otros polímeros que pudiera alterar los resultados. Gracias a esta colaboración interna, se logra reunir una cantidad considerable de kilos de desperdicio, los cuales se someten al mismo procedimiento de trituración aplicado al material analizado previamente.

No obstante, este nuevo lote se mantiene separado en todo momento por consideraciones relacionadas con el muestreo y la toma de mediciones del tamaño de grano obtenidas en las moliendas anteriores. De esta forma, se evita combinar materiales que podrían modificar los valores registrados y se conserva la trazabilidad del proceso. Una vez completada esta etapa de trituración y organización del material, se procede finalmente con la fase de extrusión, donde el grano obtenido se transforma nuevamente en filamento para su eventual uso en impresoras 3D.

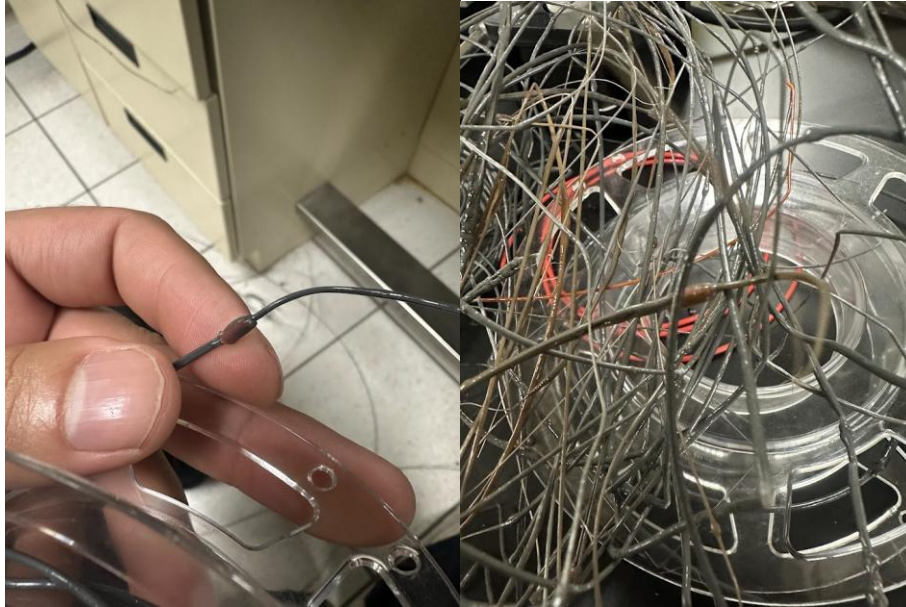


Fig. 45 y 46. Filamento con secciones de cambio de color y forma.

Durante el proceso de extrusión se identifican pequeñas secciones en las que ciertas partículas de color rojo aparecen con un tamaño mayor respecto al resto del material procesado (**Fig. 45 y 46**). Estas partículas, además de su diferencia en tamaño, presentan un color claramente distinto al tono grisáceo característico que resulta de la mezcla uniforme del resto de los componentes. Al no experimentar deformación bajo la temperatura establecida en el extrusor, estas partículas evidencian ser un material ajeno al PLA, actuando así como un contaminante dentro de la mezcla.

La presencia de este tipo de material contaminante representa un problema significativo en la creación del filamento, debido principalmente a que cada polímero posee rangos térmicos diferentes tanto de fusión como de flujo. Esto provoca inconsistencias en la extrusión, variaciones en la viscosidad del material e incluso posibles obstrucciones dentro del sistema. En consecuencia, la aparición de estos elementos no compatibles afecta de manera directa la calidad final del filamento, comprometiendo su uniformidad y su desempeño posterior en procesos de impresión 3D.



Fig. 47. Polímero contaminante en molienda.

Se puede observar en la **Fig. 47** que el material contaminante colocado sobre el extrusor, incluso trabajando a las temperaturas operativas del equipo, no presenta ningún tipo de cambio de fase. En lugar de ablandarse o deformarse, permanece completamente firme y conserva su estructura como una pieza sólida. Este comportamiento confirma la teoría de que se trata de un polímero distinto al PLA, con un rango térmico mucho mayor y, por lo tanto, incompatible con el proceso de extrusión establecido.

La presencia de este contaminante afecta de manera directa y significativa todo el lote de molienda, ya que la cantidad de partículas ajenas al PLA es considerable dentro del material triturado. Dichas partículas no solo interrumpen el flujo normal durante la extrusión, sino que también representan un riesgo de obstrucción, inestabilidad en el filamento y posibles daños al equipo. Debido a esta alta concentración de material incompatible, se determina necesario descartar temporalmente el uso de este lote hasta que pueda realizarse un proceso de purga manual, encargado de retirar cuidadosamente cada partícula contaminante antes de intentar nuevamente su procesamiento.

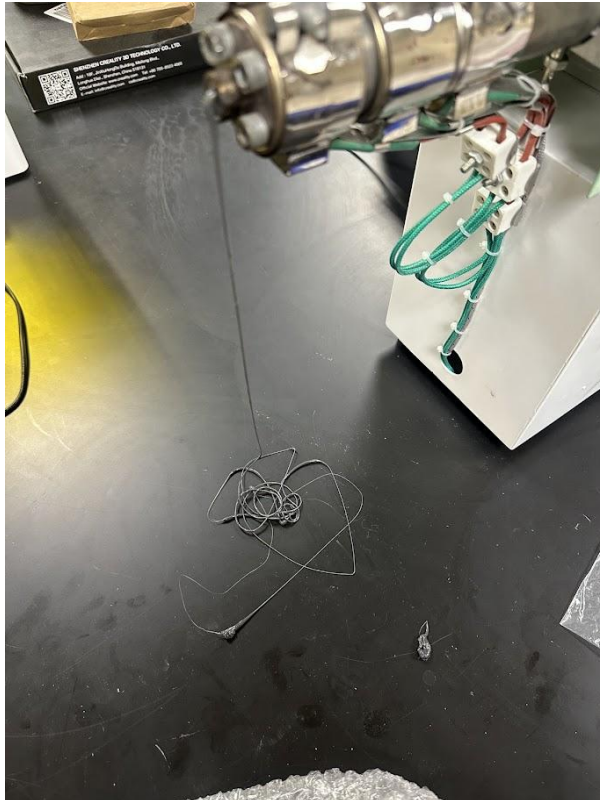


Fig. 48. Material extruido perteneciente a la investigación.

Se reinicia el proceso de extrusión del material molido en la fase 2 correspondiente al triturado de manera industrial, dando uso únicamente del material del cual se tiene la certeza que pertenece únicamente al ácido poliláctico (PLA) (**Fig. 48**), siendo este mismo el utilizado en las pruebas de laboratorio.

4.1.7.6 Maquina de fuerza de tensión

Para corregir problemas previos en la elongación controlada del material, se opta por la implementación de un sistema de arrastre del carrete controlado, que permita mantener una tensión constante, dando uso del diagrama propuesto por Shojaei (2023).

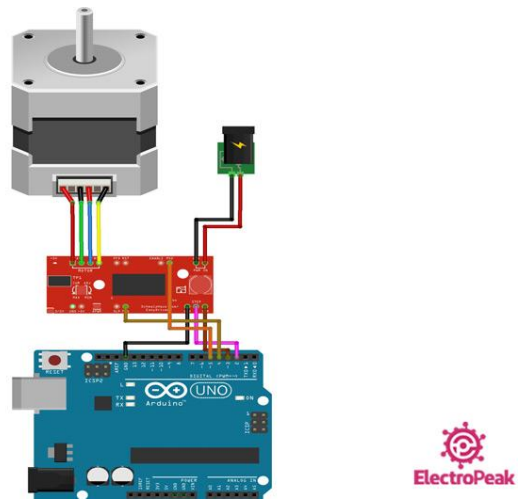


Fig. 49. Diseño electrónico.

Se desarrolla un modelo 3D (**Fig. 49**) que funciona como estructura de soporte de los componentes, agregando un una resistencia variable o potenciómetro, para ajustar los parámetros de velocidad de giro del motor stepper.

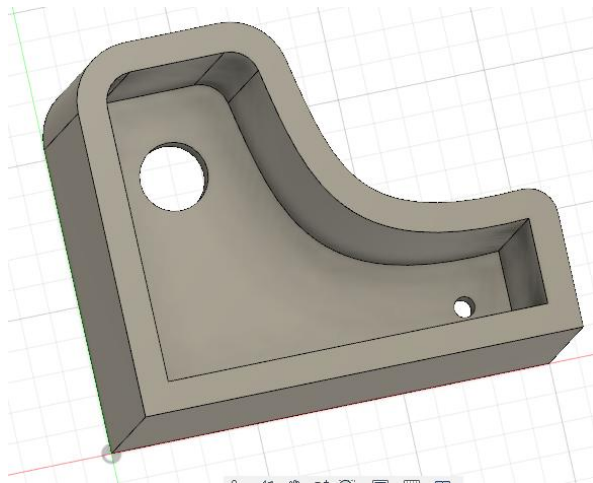


Fig. 50. Diseño CAD máquina de elongación del filamento.

La estructura considera la posición adecuada, para un carrete pequeño de diámetro de 70mm, con la posición del motor stepper a una altura de 80 mm, evitando posibles contactos del carrete con el suelo y con la posibilidad de trabajar con carretes más grande de 160 mm que se cuentan en bodega (**Fig. 50**).

4.1.7.7 Extruido controlado

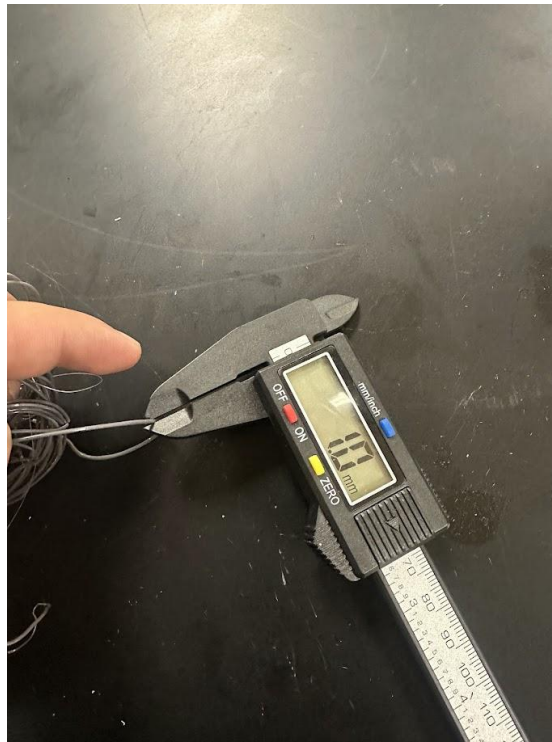


Fig 51. Tamaño de filamento a elongación de velocidad rápida.

Haciendo uso del prototipo de elongación propuesto anteriormente, el cual, si bien presenta ciertos detalles por pulir, resulta funcional y permite realizar una medición mucho más precisa de la fuerza necesaria para estirar el material, se procede a ajustar el sistema con el fin de obtener un filamento lo más cercano posible al estándar de 1.75 mm de diámetro (**Fig. 51**). Durante las primeras pruebas, y tras realizar los ajustes iniciales de velocidad, se observaron valores de diámetro cercanos al milímetro. Esto ocurría debido a que, además de la fuerza ejercida por el motor, intervenían también las fuerzas de gravedad, generando un estiramiento adicional del filamento a medida que descendía.

Como consecuencia, en varios de los valores de revolución empleados se obtenían diámetros muy similares entre sí, ya que ambas fuerzas, la tracción del motor y el peso propio del material aún caliente, actuaban simultáneamente sobre el filamento. Este comportamiento permitió identificar la influencia directa del equilibrio

entre velocidad de tracción, viscosidad del material y efecto gravitacional, información clave para seguir ajustando el prototipo y alcanzar el diámetro estándar requerido.

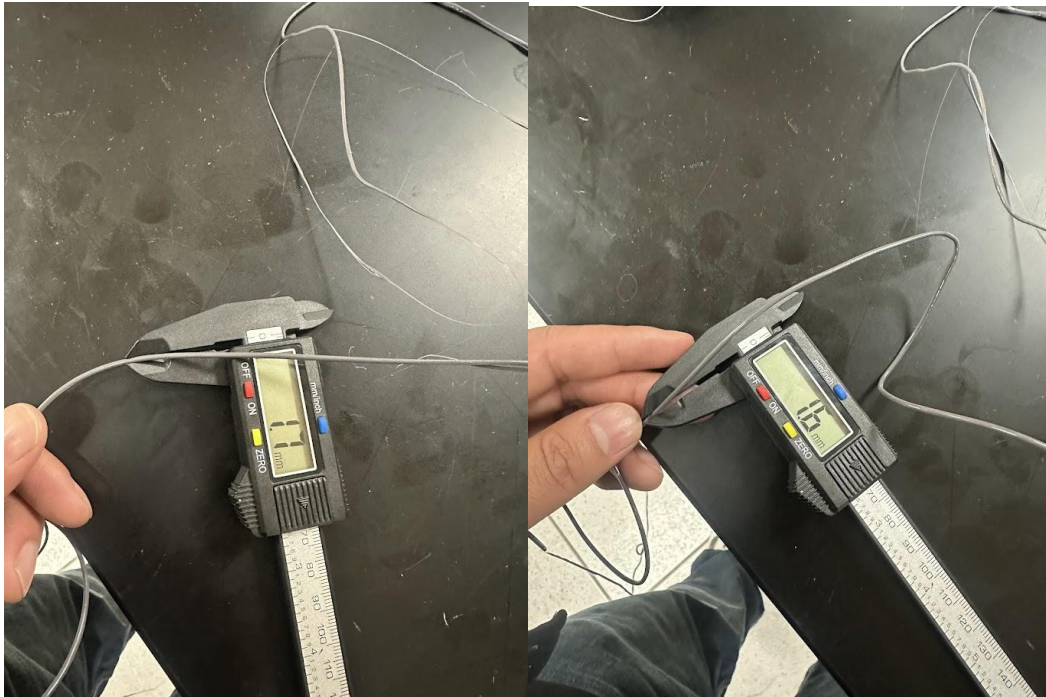


Fig 52 y 53. Material a menor velocidad de elongación.

Posterior a realizar los ajustes necesarios en el prototipo, se optó por trabajar con velocidades menores a las utilizadas previamente. Esto permitió tener un mayor control sobre el estiramiento del filamento y, al mismo tiempo, reducir el efecto que las fuerzas de gravedad ejercían sobre el material aún caliente. Para lograrlo, se incorporó una superficie lisa ubicada muy cerca de la boquilla del extrusor; en este caso, una placa de acero inoxidable pulido. Esta superficie facilitaba el desplazamiento del filamento recién extruido sin generar fricción excesiva, además de contribuir a una disipación más rápida del calor.

La rápida pérdida de temperatura resultó particularmente útil, ya que permitió que el filamento adquiriera una forma más estable y uniforme antes de continuar su recorrido. Gracias a estas modificaciones, se lograron diámetros que oscilan entre 1.6 y 1.7 mm (**Fig. 52 y 53**), valores que se encuentran dentro de un rango perfectamente aceptable para su uso en máquinas de manufactura aditiva. La media obtenida se mantuvo muy cercana al estándar comercial de 1.75 mm, demostrando que el

sistema, aunque aún en mejora, es capaz de producir filamento con dimensiones adecuadas para impresión 3D.

4.1.7.8 Impresión 3D material reformado

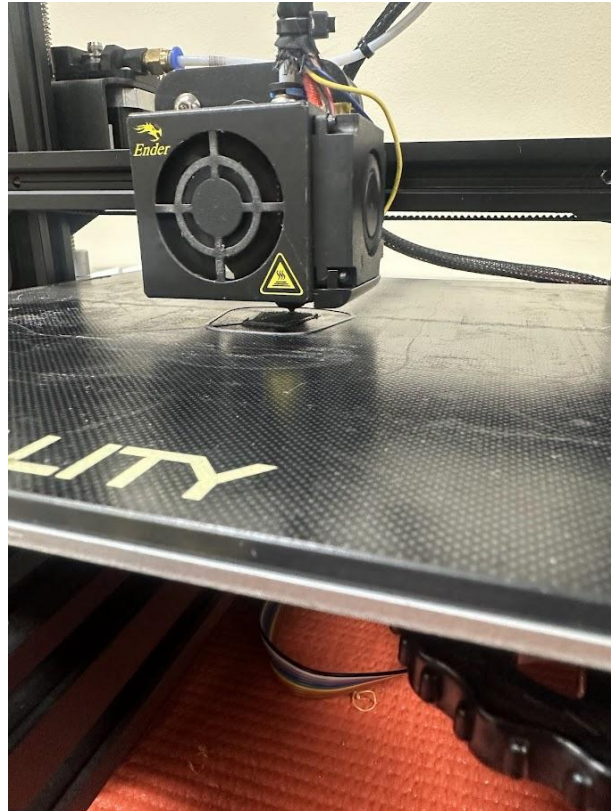


Fig. 54. Material reformado siendo reutilizado en manufactura aditiva.

El material extruido descrito en el procedimiento anterior es posteriormente introducido en una impresora 3D Ender 3 de la marca Creality (**Fig. 54**). La elección de este modelo se debe principalmente a su sencillez de funcionamiento, su capacidad para trabajar con filamento no convencional y la facilidad que ofrece para realizar tareas de mantenimiento.

Esto es especialmente importante en una primera prueba de impresión con un filamento reformado, ya que existe la posibilidad de que se presenten atascos o irregularidades durante la alimentación del material. La Ender 3, al ser una máquina ampliamente documentada y de diseño abierto, permite una intervención rápida y directa ante cualquier inconveniente, lo cual la convierte en una herramienta ideal para validar la calidad y el comportamiento del filamento reciclado en un entorno controlado.

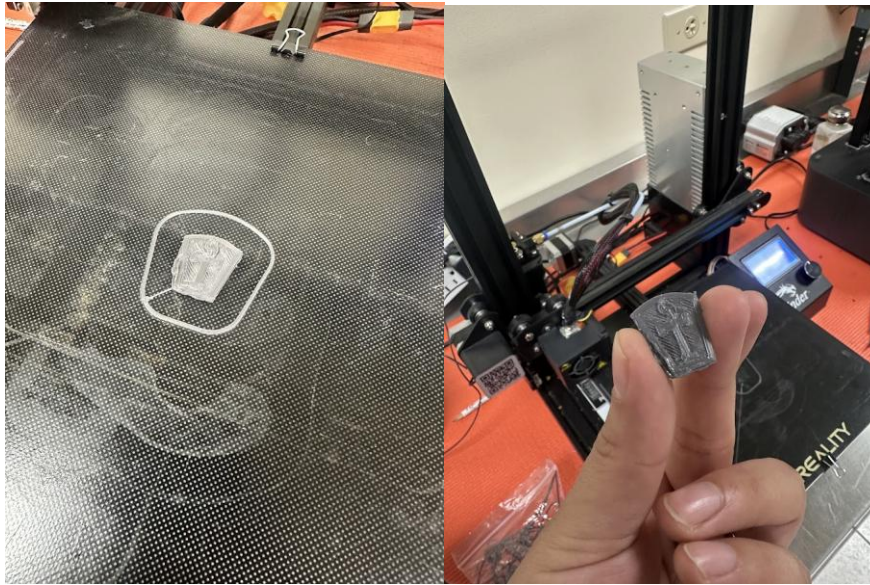


Fig. 55. Producto de la impresión 3D de filamento reformado.

Se logra obtener una impresión 3D completa (**Fig. 55**) sin presentar ningún tipo de atasco por parte de la máquina FDM, lo cual confirma el correcto funcionamiento del filamento reformado y demuestra su viabilidad para ser reutilizado en la fabricación de nuevas piezas mediante manufactura aditiva. Este resultado valida tanto el proceso de molienda y extrusión como la calidad del filamento obtenido, evidenciando que, pese a tratarse de material reciclado, puede desempeñarse adecuadamente dentro de los parámetros estándar de una impresora convencional.

En el producto final se observan pequeñas imperfecciones superficiales, principalmente asociadas a la presencia de humedad dentro del filamento. Este tipo de defectos es común incluso en filamentos comerciales que han permanecido abiertos durante periodos prolongados o que han sido almacenados en condiciones con humedad constante. Afortunadamente, este problema puede evitarse fácilmente utilizando un secador de filamento previo al proceso de extrusión o incluso antes de la impresión, asegurando así un material más estable y una calidad superior en las piezas resultantes.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Al obtener los primeros resultados derivados del análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), se pudo constatar que, en términos de tamaño de grano o bien, morfología superficial, el polímero no presentaba cambios significativos tras su ciclo de trabajo. Este hallazgo permitió respaldar de manera sólida la hipótesis planteada inicialmente, la cual establece la viabilidad del reformado del material sin pérdida considerable de sus características morfológicas primarias.

Posteriormente, los datos obtenidos mediante las pruebas termogravimétricas (TGA) permitieron identificar una diferencia significativa entre las condiciones térmicas de trabajo habituales del material y el rango de temperatura en el que se produce una pérdida másica sustancial. Esta diferencia de aproximadamente 130 °C reafirma que el polímero puede ser procesado de nuevo sin alcanzar su punto crítico de degradación térmica, fortaleciendo así los fundamentos de nuestra hipótesis.

A pesar de que los resultados obtenidos hasta este punto se mostraron favorables para la continuidad del estudio, se consideró inicialmente la posibilidad de dopar el material con refuerzos o aditivos para compensar supuestas pérdidas en sus propiedades mecánicas o químicas. Sin embargo, los ensayos realizados indicaron una conservación adecuada de sus propiedades funcionales, lo que permitió descartar, al menos por el momento, la necesidad de modificar químicamente el polímero. Esto conlleva una simplificación importante en el proceso, limitándolo a las etapas de trituración y reextrusión mediante una máquina de extrusión de filamento comercial.

De igual manera, se refuerza y confirma nuestra hipótesis sobre la viabilidad del reformado de dicho material, al haber sido posible procesarlo y reutilizarlo en una máquina FDM obteniendo como resultado una pieza funcional. La impresión se compuso de capas de filamento depositadas de manera controlada y uniforme, permitiendo alcanzar la geometría deseada sin presentar atascos, interrupciones ni fallas atribuibles al material reformado. Esto valida nuevamente el potencial de

reciclaje y reaprovechamiento del polímero comercial de impresión dentro de procesos de manufactura aditiva.

No obstante, con el fin de validar de forma más robusta las conclusiones alcanzadas, se plantea como parte de un trabajo futuro la realización de ensayos adicionales de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), que permitirían verificar posibles alteraciones estructurales a nivel molecular. Estas pruebas tienen como objetivo complementar los resultados obtenidos, ofreciendo un respaldo técnico más completo a las acciones y decisiones tomadas a lo largo del desarrollo experimental.

REFERENCIAS

- A. Savini and G. G. Savini, "A short history of 3D printing, a technological revolution just started," 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON), Tel-Aviv, Israel, 2015, pp. 1-8, doi: 10.1109/HISTELCON.2015.7307314.
- ACEROMAFE. (2023). CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL ABS Y MOTIVOS PARA USARLO. Recuperado de ¿Para qué sirve el material ABS?: <https://www.aceromafe.com/material-abs/>
- Acoplásticos. (2023). PET. Recuperado de: ¿Qué es el PET?: <https://www.acoplásticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/36-opc-fag-pre4>
- American Concrete Institute. (s.f.). Fiber Reinforced Polymer. <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail.aspx?search=fiber%20reinforced%20polymer>
- ATRIA Innovation. (s.f.). ¿Qué es el ángulo de contacto?. <https://atriainnovation.com/blog/que-es-el-angulo-de-contacto/>
- CEAD Group. (s.f.). Thermoplastic pellets for large-scale 3D printing explained. <https://ceadgroup.com/thermoplastic-pellets-for-large-scale-3d-printing-explained/>
- CIDEAS. (2022). BUILDPARTS. Recuperado de VEROWHITE PLUS: <https://www.buildparts.com/materials/verowhiteplus/>
- Createc3D. (s.f.). Filamento PLA y ABS: Fabricación para las impresoras 3D. Createc3D. Recuperado de <https://createc3d.com/blog/fabricacion-filamento-pla-abs/createc3d.com>
- Contreras, L. (2019, julio 23). 3DNatives. Recuperado de ¿Qué tan «ecológico» es realmente el filamento PLA?: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!>

- Ebeling, F.-W., Huberth, H., Schirber, H., & Schlör, N. (2002). *Ciencia de los plásticos: Composición, propiedades, procesamiento y aplicaciones de los termoplásticos, duroplásticos y elastómeros* (posible adaptación de *Kunststoffkunde*). Vogel Communications Group GmbH & Co. KG. [WorldCat](#)
- Electropeak. (s.f.). Interfacing A3967 EasyDriver stepper motor driver with Arduino. <https://electropeak.com/learn/interfacing-a3967-easydriver-stepper-motor-driver-with-arduino/>
- Ensinger. (2023). ABS - Acrilonitrilo butadieno estireno. Recuperado de: Plásticos TECARAN ABS de Ensinger: <https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plasticos-industriales/abs>
- Extrapolate. (s.f.). Mercado de impresión 3D: Tamaño, participación y análisis. Extrapolate. Recuperado de <https://extrapolate.com/es/semiconductor-electronics/3d-printing-market-25629>
- Hernandez, G. (2020, Julio). Máquina de reciclado de material para impresión 3D. Mendeley. Recuperado Mayo 13, 2023, de <https://www.mendeley.com/reference-manager/reader/95c39794-b2e5-399b-a9c2-5fe0ab49483c/79bbc4b8-0006-57c7-06b8-2ad73bb87235/>
- Hernandez, G. (2020, Julio). Máquina de reciclado de material para impresión 3D. Mendeley. Recuperado Mayo 13, 2023, de <https://www.mendeley.com/reference-manager/reader/95c39794-b2e5-399b-a9c2-5fe0ab49483c/79bbc4b8-0006-57c7-06b8-2ad73bb87235/>
- La Mantia, F. (Ed.). (2002). *Handbook of plastics recycling*. Rapra Technology.
- León, M., Marcos-Fernández, Á., & Rodríguez-Hernández, J. (2019). Impresión 3D con materiales elásticos.
- Matmach. (2023). Polyamide Nylon: Properties, Production and Applications. Retrieved from General properties of polyamide nylon: <https://matmatch.com/learn/material/polyamide-nylon>

MECASIN. (s. f.). El Nylon es un plástico que se mecaniza. Retrieved from Nylon 66:
<https://www.mecanizadossinc.com/nylon-plastico-se-mecaniza>

Menges, G., Flórez, J., & Osswald, T. A. (2010). *Ciencia de polímeros para ingenieros / Polymer science for engineers*. Editorial Guadales Limitada.

METTLER TOLEDO. (s.f.). Thermogravimetric Analysis.
https://www.mt.com/es/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric_Analysis.html

Nanoscience Instruments. (2025). SEM. Recuperado de Scanning electron microscopy. <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>

Nanotec. (s.f.). ¿Qué son los nanotubos de carbono?. <https://www.nanotec.es/que-son-los-nanotubos-de-carbono/>

Narváez, J. S. B., & Reyes, J. L. T. (2023). Estado del arte de la metodología y/o factibilidad del aprovechamiento de material (PLA, PETG) residual en la manufactura aditiva (Impresión 3D). Disponible en: <https://hdl.handle.net/11059/14569>

PIXEL. (s. f.). Fabricación Aditiva. Recuperado de Materiales: <https://www.pixelsistemas.com/fabricacion-aditiva-impresion-3d/tecnologia-fdm/materiales>

Plásticos Brello. (2018). Materiales. Recuperado de: PLA: <https://plasticos-brello.com/material/pla-acido-polilactico/>

Pochteca Chile. (s.f.). Los elastómeros: características y aplicaciones. <https://chile.pochteca.net/los-elastomeros-caracteristicas-y-aplicaciones/#:~:text=Los%20elast%C3%B3meros%20son%20pol%C3%ADmeros%20o,original%20sin%20perder%20sus%20cualidades.>

Reyes, L. G. (2017). Análisis documental de los inconvenientes de la impresión 3D. *3c Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 6(3), 48-53.

- Rojas González, A. F., & Osswald, T. A. (2016). *Determinación de la degradación térmica de polímeros por análisis de cambio de color*. *Ingeniería*, 21(1), 19–30. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.1.a02>
- Segura, D., Noguez, R., & Espín, G. (2007). Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables. *Biotecnología*, 14(3), 361-372.
- Serna, L., & Albán, F. (2003). Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, 5(1), 16-26.
- Sintac. (s.f.). ¿Qué son los termoplásticos?. <https://sintac.es/que-son-los-termoplasticos/>
- Stratasys. (2023). Industrias y aplicaciones. Recuperado de ¿Cómo funciona la impresión 3D de inyección de material PolyJet™?: <https://www.stratasys.com/mx/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>
- Stratasys. (2023). Polyjet. Recuperado de Materiales dentales: <https://support.stratasys.com/es/materials/polyjet/dental-materials>
- Taiced. (s.f.). Materiales para tecnología FDM o FFF. <https://www.taiced.com/post/materiales-para-tecnologia-fdm-o-fff>
- Tractus 3D. (2020). Materiales. Recuperado de Filamento de PETG: <https://tractus3d.com/es/materials/petg/>
- Universidad de Alicante. (s.f.). Tema 4: Extrusión. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf
- Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). Análisis termogravimétrico. <https://www.fisica.unam.mx/liquids/Analisis%20termogravimetrico.pdf>
- YouTube. (2016, 5 de septiembre). Cómo se fabrica el filamento para impresoras 3D [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=xCG-sNohGWc>
- Zapata, J. A., & Rodríguez, M. A. (2019). Impresión 3D: La nueva revolución industrial. *I+T+C: Investigación, Tecnología y Ciencia*, (2019), 60–71.

https://revistas.unicomfacauca.edu.co/ojs/index.php/itc/article/view/itc2019_pag_60_71/202