UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

Reutilización y Modificación de Bolsas Biodegradables de PLA para Aplicaciones Avanzadas en Manufactura

POR

Cecilia Del Pilar Contreras Fuentes

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Doctor Carlos Andrés Medina Muñoz

Enero 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Cecilia Del Pilar Contreras Fuentes
© 2025 Cecilia Del Pilar Contreras Fuentes
Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Dedico esta memoria a Alan, mi compañero de vida.
Aunque ya no estés aquí, esto es para ti.

Resumen

La creciente demanda de materiales sostenibles como alternativa a los convencionales ha impulsado la necesidad de prácticas de fabricación responsables que equilibren el uso eficiente de recursos limitados, reduzcan el impacto ambiental y mantengan la viabilidad económica, promoviendo al mismo tiempo el bienestar humano. En este contexto, el uso de PLA reciclado en la impresión 3D surge como una solución prometedora para disminuir los costos y la huella ambiental asociados al uso de PLA virgen. Sin embargo, uno de los principales desafíos radica en la baja resistencia mecánica de los componentes fabricados con PLA reciclado, lo que subraya la necesidad de comprender y optimizar sus propiedades mecánicas y su potencial de sostenibilidad.

Este estudio evaluó el desempeño del PLA reciclado en la impresión 3D mediante la creación de mezclas con PLA virgen y la incorporación de glicerina como plastificante. Se analizaron propiedades mecánicas, calidad del filamento y rendimiento en impresión 3D. Los resultados demuestran que el PLA reciclado puede ser una alternativa viable al PLA virgen si sus propiedades se modifican y controlan adecuadamente. Además, estrategias como la combinación con materiales vírgenes, la optimización de parámetros de impresión y el uso de aditivos han mostrado ser efectivas para mejorar el comportamiento del PLA reciclado. Los estudios demuestran una disminución de propiedades de hasta el 40%, por lo que la mezcla de PLA reciclado y virgen se presentó dentro de las estadísticas aceptable, haciéndolo así un candidato importante para aplicaciones de impresión 3D. Aunque gran parte de las investigaciones se han centrado en los beneficios ambientales del PLA reciclado, esta investigación también aborda las dimensiones económicas y sociales de su implementación, incluyendo un análisis del mercado de producción de filamentos para impresión 3D. A pesar de los avances, se requiere más investigación para comprender plenamente los impactos ambientales, económicos y sociales del uso de PLA reciclado en la fabricación aditiva.

Los hallazgos de este estudio consiguieron demostrar una vez más, en conjunto con los estudios previos, que es necesaria la adición de material virgen para poder controlar la degradación de propiedades referida a materiales reciclados. Además, aporta una base sólida para que profesionales y académicos exploren el potencial de los materiales reciclados y los adapten a las necesidades específicas de sus aplicaciones, fomentando así la economía circular y la sostenibilidad en la industria de manufactura avanzada.

Abstract

The increasing demand for sustainable materials as alternatives to conventional ones has driven the need for responsible manufacturing practices that balance the efficient use of limited resources, reduce environmental impact, and maintain economic viability while promoting human well-being. In this context, the use of recycled PLA in 3D printing emerges as a promising solution to lower costs and the environmental footprint associated with virgin PLA. However, one of the main challenges lies in the low mechanical strength of components made with recycled PLA, highlighting the need to understand and optimize its mechanical properties and sustainability potential.

This study evaluated the performance of recycled PLA in 3D printing by creating blends with virgin PLA and incorporating glycerin as a plasticizer. Mechanical properties, filament quality, and 3D printing performance were analyzed. The results demonstrate that recycled PLA can be a viable alternative to virgin PLA if its properties are adequately modified and controlled. Furthermore, strategies such as combining with virgin materials, optimizing printing parameters, and using additives have proven effective in improving the performance of recycled PLA. Studies indicate a reduction in properties of up to 40%, making the blend of recycled and virgin PLA statistically acceptable and positioning it as a significant candidate for 3D printing applications. While much research has focused on the environmental benefits of recycled PLA, this study also addresses the economic and social dimensions of its implementation, including an analysis of the 3D printing filament production market. Despite the progress made, further research is needed to fully understand the environmental, economic, and social impacts of using recycled PLA in additive manufacturing.

The findings of this study once again demonstrated, in conjunction with previous research, the necessity of adding virgin material to control the degradation of properties observed in recycled materials. Additionally, it provides a solid foundation for professionals and academics to explore the potential of recycled materials and adapt them to the specific needs of their applications, thereby fostering a circular economy and sustainability in the advanced manufacturing industry.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos i
Lista de Figuras ii
Lista de Tablas iv
Glosario v
1 CAPÍTULO 1: Introducción 1
1.1 Contexto 1
1.2 Estado del Arte 3
1.3 Objetivos 4
2 CAPITULO 2: Materiales y Métodos 6
2.1 Materiales 6
2.2 Procesos 9
2.3 Ensayos 21
3 CAPÍTULO 3: Análisis Fabricación Masterbatch 27
3.1 Resultados factibilidad económica 27
3.2 Resultados mecánicos probetas inyectadas 29
3.3 Discusiones de propiedades mecánicas y efecto de la glicerina 31
4 CAPITULO 4: Resultados impresión 3D 34
4.1 Resultados de la calidad de impresión 34
4.2 Índice de circularidad 35
4.3 Test de voladizo 37
4.4 Test de exactitud dimensional 38
4.5 Discusiones calidad de impresión y geometría del filamento 41
5 CAPITULO 6: Conclusiones 43
Referencias 45

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de una extrusora. Fuente: [26] 10
Figura 2. Sistema de funcionamiento de una picadora. Fuente: Propia. 11
Figura 3. Sistema de extrusión. Fuente:[27] 13
Figura 4. Mapa conceptual de las mezclas necesarias. 14
Figura 5. Inyectora. Fuente: [28] 16
Figura 6. Parámetros y características de probetas tipo V. Fuente: [29] 17
Figura 7. Conjunto de extrusión y bobinado utilizado. Fuente: [31]. 18
Figura 8. Boquilla de extrusión actual. Fuente: Propia. 19
Figura 9. Impresora Ender 3 Creality. Fuente: [32] 20
Figura 10. Máquina Zwick Roell Z005. Fuente: [34] 22
Figura 11. Benchy Boat. Fuente: [36] 23
Figura 12. Elementos circulares del benchy boat. Fuente: [36] 23
Figura 13. Referencia medición. 24
Figura 14. Elementos en voladizo. Fuente: [36] 25
Figura 15. Dimensiones generales. Fuente: [36] 26
Figura 16. Pellets PLA UNIBAG. Fuente: Propia. 27
Figura 17. Esquematización del cálculo costo de producción. Fuente: Propia. 28
Figura 18. Esquematización del costo de producción. Fuente: Propia. 29
Figura 19. Probetas inyectadas. Fuente: Propia. 30
Figura 20. Filamento fabricado. Fuente: Propia. 34
Figura 21. Benchy Boat. a) Filamento 100% PLA UNIBAG, b) Filamento 70% PLA UNIBAG y 30% PLA virgen. Fuente: Propia. 34
Figura 22. Medidas circulares del modelo impreso con PLA 100% UNIBAG. a) Redondez de la chimenea, b) Diámetro del tubo de escobén, c) Tamaño de la ventana trasera del puente. Fuente: Propia. 35
Figura 23. Medidas circulares del modelo impreso con 70% PLA UNIBAG y 30% PLA VIRGEN. a) Redondez de la chimenea, b) Diámetro del tubo de escobén, c) Tamaño de la ventana trasera del puente. Fuente: Propia. 35
Figura 24. Inclinaciones del modelo impreso con PLA 100% UNIBAG. a) Inclinación del voladizo de proa, b) Inclinación del techo del puente. Fuente: Propia. 37
Figura 25. Inclinaciones del modelo impreso con 70% PLA UNIBAG y 30% PLA VIRGEN. a) Inclinación del voladizo de proa, b) Inclinación del techo del puente. Fuente: Propia. 37
Figura 26. Dimensiones del modelo impreso con PLA 100% UNIBAG. a) Longitud del techo del puente, b) Longitud total horizontal, c) Ancho total horizontal, d) Altura total vertical, e) Tamaño de la caja de carga, f) Tamaño de la ventana frontal del puente. Fuente: Propia. 38
Figura 27. Dimensiones del modelo impreso con 70% PLA UNIBAG y 30% PLA VIRGEN. a) Longitud del techo del puente, b) Longitud total horizontal, c) Ancho total horizontal, d) Altura total vertical, e) Tamaño de la caja de carga, f) Tamaño de la ventana frontal del puente. Fuente: Propia. 39

Figura 28. Tarifas CGE. 48
Figura 29. Diseño molde para probetas tipo V. Fuente: Propia. 49
Figura 30. Gráficos obtenidos del ensayo de tracción de mezcla de PLA reciclado. a) PLA 100% reciclado. b) PLA reciclado con 3% GLI. C) PLA reciclado con 6% GLI. Fuente: Propia..... 50
Figura 31. Gráficos obtenidos del ensayo de tracción de mezcla de PLA reciclado. a) PLA reciclado y PLA virgen. b) PLA reciclado y PLA virgen con 3% GLI. C) PLA reciclado y PLA virgen con 6% GLI. Fuente: Propia. 51
Figura 32. Planos de fabricación. Fuente: Propia. 52

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades generales de los polímeros PLA. 7
Tabla 2. Características y propiedades Glicerina. 9
Tabla 3. Parámetros por utilizar en el proceso de extrusión. 11
Tabla 4. Velocidades del proceso. 11
Tabla 5. Costos para considerar según tarifa BT2. 13
Tabla 6. Parámetros de extrusión de mezclas en sistema de mesa Filabot. 15
Tabla 7. Parámetros de funcionamiento de la inyectora manual. 17
Tabla 8. Especificaciones de la Ender 3 V3 20
Tabla 9. Parámetros de internacionales de filamentos. 21
Tabla 10. Parámetros recomendados. 23
Tabla 11. Parámetros de evaluación. 25
Tabla 12. Resultados de los ensayos de tracción. 30
Tabla 13. Resultados índices de circularidad por filamento. 36

Glosario

CO2	:	Dióxido de Carbono
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero
CIEL	:	Center for International Environmental Law
PLA	:	Ácido Poliláctico
REP	:	Responsabilidad Extendida del Productor
3D	:	Tres Dimensiones
LA	:	Ácido Láctico
US	:	Dólares
WF	:	Harina de madera
PGA	:	Poliglicolida
PHBV	:	Poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato)
PCL	:	Policaprolactona
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
AM	:	Additive Manufacturing
FDM	:	Fused Deposition Modeling
GLI	:	Glicerina
V	:	Voltios
E	:	Módulo Elástico
Clp	:	Pesos chilenos
Tm	:	Tonelada métrica
MR	:	Reciclaje Mecánico
kW	:	Kilo Watt
CGE	:	Compañía General de Electricidad
Rpm	:	Revoluciones por minuto
STL	:	Estereolitografía
CUP	:	Costo unitario de producción
CUM	:	Costo unitario de mercado
IVA	:	Impuesto al valor agregado
MPa	:	Mega Pascales

Símbolos

σ_M	:	Resistencia Máxima
ε_M	:	Deformación Máxima
°C	:	Grados Celsiuis
mm/s	:	Milímetros por segundo
mm/s2	:	Milímetros por Segundo cuadrado
m/m	:	Masa - Masa
N	:	Newton

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

El término plástico se utiliza comúnmente para describir una amplia variedad de materiales sintéticos o semisintéticos, fabricados a partir de recursos naturales como la celulosa, el carbón, el gas natural, la sal y el petróleo, a través de procesos de polimerización o policondensación. No obstante, a largo plazo, la producción de plásticos debería desvincularse de este tipo de materias primas. Esto significa que, en el futuro, la inmensa mayoría de los plásticos se obtendrá a partir de materias primas alternativas, como aceites reciclados o plásticos secundarios, biomasa sostenible o incluso CO2 [1].

En los últimos 100 años, los plásticos han ofrecido soluciones innovadoras a las necesidades y desafíos de una sociedad en constante evolución. Versátiles, duraderos e increíblemente adaptables, los plásticos constituyen una familia de materiales extraordinarios que hoy en día, permiten satisfacer innumerables exigencias funcionales y estéticas. Es por ello por lo que la producción y uso de plásticos a nivel global ha experimentado un crecimiento exponencial, impulsado por las ventajas que ofrecen, como sus propiedades mecánicas y beneficios económicos. No obstante, el uso masivo de plásticos también trae consigo graves consecuencias, se estima que cada año se producen más de 430 millones de toneladas de plástico, dos tercios de las cuales se desechan tras un solo uso. Si la tendencia continúa, los desechos plásticos se triplicarán para 2060, con graves consecuencias para los ecosistemas y la salud humana [2].

Los principales problemas del plástico derivan tanto de su producción como en su eliminación, la primera de ellas relacionada directamente con la emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero producidos en su mayoría por la extracción, transporte de combustibles fósiles (involucrados en su fabricación) y posterior refinamiento para el sector manufacturero, de este último, tan solo en el 2015 se produjeron entre 184.3 a 213 millones tm de CO2 para la producción de etileno, que es lo que contaminarían 45 millones de vehículos durante un año [3].

El aumento del nivel de los gases de efecto invernadero (GEI) a manos del hombre provoca un aumento de las temperaturas en la tierra, acelerando el deshielo de los polos, la desertificación, incendio, tormentas e inundaciones.

También así, la errónea eliminación del plástico ya sea por incineración que contribuye GEI también produce una acumulación de este en vertederos o muchas veces tapando vías fluviales, invadiendo suelos agrícolas, ríos y finalmente, una gran porción llega al océano, generando graves consecuencias para todos los ecosistemas. Un estudio de Sarah-Jeanne Royer publicado en Plos One [4] demostró que el plástico en la superficie del océano libera continuamente metano y otros GEI, considerando que los océanos funcionan como filtros naturales para absorber entre el 20% y 40% del carbono antropogénico que se emite con la contaminación industrial, es un peligro que los micro plásticos se encuentren en la superficie debido a que tienen la capacidad de interferir con la capacidad del océano para absorber y secuestrar el CO2 del ambiente.

Según -Center for International Environmental Law (CIEL) en su revista Plastic & Climate the Hidden Costs of a Plastic Planet, si se continua con este ritmo de producción, las emisiones anuales de plástico para 2050 podrían crecer a más de 2,75 billones de toneladas métricas de CO2 de producción e incineración de plástico.

Chile actualmente genera unas 33.000 toneladas anuales de plásticos, total del que más de 23.240 toneladas corresponden a aquellos de un solo uso, y apenas el 8,5% de estos es reciclado [2]. Debido a la baja tasa de biodegradación el porcentaje de plástico que queda acumulado en la superficie se vuelve sumamente peligroso ya que se convierte en micro plásticos que afectan silenciosamente a la salud.

Uno de los principales sectores con mayor producción de plástico es el packaging, es por eso que en Julio 2018 Chile promulgó la Ley 21.100: "Prohíbe la entrega de bolsas plásticas de comercio en todo el territorio nacional". Cuyo fundamento se basa en la protección del medio ambiente, establece la prohibición de entregar bolsas plásticas de comercio en todo el territorio nacional. Se excluyen de esta prohibición las bolsas que constituyan el envase primario de alimentos, que sea necesario por razones higiénicas o porque su uso ayude a prevenir el desperdicio de alimentos. [5]

Con dicha prohibición y un lapso de dos años para la adherencia total a la nueva ley, las industrias del sector optaron por la medida de reemplazar dichas bolsas plásticas por bolsas con un mayor grado de biodegradabilidad. Para ello, UNIBAG se posiciona en Chile como la empresa líder en fabricación de bolsas reutilizables desde el año 2014 y desde el 2018 se convirtió en el principal fabricante de bolsas reutilizables vegetales, fabricadas con tela 100% a base de almidón de maíz, sin derivados del petróleo, esto es el Ácido poliláctico (PLA), la empresa mensualmente tiene una producción de 2,5 millones de bolsas reutilizables, por lo cual es de suma importancia que cada empresa que adquiera sus productos se haga responsables de sus residuos, es por ello que Chile en 2016 promulgó la Ley 20.920: "Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje". Que tiene por objetivo incorporar la valorización de los residuos como un elemento primordial en la gestión de los residuos sólidos, un instrumento económico que busca generar mecanismos que permitan aumentar los niveles de reciclaje de los residuos que actualmente se disponen en rellenos sanitarios o son depositados en vertederos ilegales. [6]

Se establece algunos instrumentos de gestión ambiental en materia de residuos, destacando entre ellos la REP, (Responsabilidad Extendida del Productor) la que se traduce en que el fabricante o importador deberá hacerse cargo del producto una vez terminada su vida útil, debiendo cumplir metas de reciclaje establecidas por el Ministerio del Medio Ambiente. La REP, implica que los productores de productos prioritarios deben cumplir con ciertas obligaciones tales como registrarse, organizar y financiar la gestión de residuo, cumplir metas de recolección y valorización a través de alguno de los sistemas de gestión y asegurar que el tratamiento de los residuos recolectados se realice por gestores autorizados.[6]

Para cumplir con dicha ley las empresas han adoptado diferentes medidas de reciclajes para sus residuos basados en un concepto de economía circular, en particular los residuos del packaging, que ahora son bolsas reutilizables de PLA, los esfuerzos se centran por encontrar procesos avanzados de

manufactura, principalmente evaluar la factibilidad de dicho material para ser utilizado como filamento de impresión 3D, para ello se necesita una caracterización exhaustiva de sus propiedades bajo pruebas estandarizadas y a su vez con dichas propiedad analizar la posibilidad de la creación de otro tipo de productos con un valor añadido al inicial, esto bajo en concepto de upcycling.

1.2 Estado del Arte

PLA es un poliéster sintetizado a partir del ácido láctico (LA) que se puede producir mediante la fermentación de azúcares o almidones. Según, *Rudnik y Briassoulis, 2011; Tsuji, 2013; Hajighasemi y otros, 2016; Satti y otros, 2017* [7] anualmente se producen en el mundo 145.000 toneladas con un crecimiento de alrededor del 40%, lo que lo convierte en el biopolímero con mayor proyección comercial por su fácil procesabilidad, alta transparencia, baja toxicidad y bajo costo (<US$ 4/kg). Sin embargo, una de las mayores desventajas del PLA es su baja tasa de biodegradación. *Tsuji* [7] estimó que la biodegradación del PLA en el suelo ocurre sólo después de un período estimado de 43 años.

El mercado de la impresión 3D está en constante auge y con él, el de los filamentos de impresión, es por eso que el uso de PLA reciclado en la impresión 3D podría ser una solución prometedora para reducir el costo y el impacto ambiental del uso de PLA virgen en la impresión 3D. Los estudios han demostrado que hay una escasez de evaluaciones técnicas de los materiales impresos en 3D con PLA reciclado y que no se ha explorado en profundidad el impacto social de la fabricación aditiva. Así también, la baja resistencia de los componentes impresos con PLA reciclado sigue siendo un desafío, es por eso por lo que se han realizado diversas investigaciones sobre la mejora de las propiedades del material.

Stojcevski et al [8], estudió la posibilidad de mezclar PLA con Cobre, dicha mezcla resultó exitosa y se observó una ventaja obvia para todos los filamentos extruidos en resistencia a la tracción y tenacidad a la fractura en comparación con el filamento comercial, y el filamento comercial superó al filamento extruido en módulo de tracción y resistencia a la flexión.

Así también, *Davies et al* [9] estudió la adición de fibras de Lino con propósito de poder mejorar las propiedades mecánicas, evaluando su comportamiento en un ambiente marino ante cualquier posible uso. Se demostró que la adición de un 10% en peso de fibras cortas de lino al PLA aumenta la rigidez del material, pero no afecta a la resistencia. Reciclar el compuesto hasta 4 veces no cambia la resistencia a la tracción o a la flexión ni la rigidez. El envejecimiento en agua de mar de estos materiales da como resultado grandes ganancias de peso, hasta un 10% después de nueve meses, y una reducción de hasta un 60% en la resistencia. Sin embargo, no hay diferencia en el comportamiento del envejecimiento en agua de mar entre el lino/PLA virgen y reciclado. A su vez *Jubinville et al* [10], investigó los efectos del reciclado simulado de PLA y PLA maleado mediante procesos termomecánicos en su estructura y propiedades fisicoquímicas y combinado con harina de madera (WF) prístina y modificada para biocompositos. Y se obtuvo que las muestras modificadas tenían capacidades superiores de repelencia al agua y estabilidad dimensional de los compuestos de madera y plástico.

Por otra parte, existe una gran posibilidad de poder darle directamente otros usos al PLA explotando sus propiedades naturales, entre esto destaca, *Muzamil Hussain et al* [11] que estudió el uso de PLA en la industria biomédica, los resultados de diferentes dispositivos fabricados con biomateriales a base de PLA los hacen adecuados en comparación con los dispositivos biomédicos convencionales debido a su completa reabsorción o degradación en el cuerpo humano. El PLA de grado biomédico es el biopolímero biodegradable más utilizado para dispositivos biomédicos. Los copolímeros o mezclas de materiales biodegradables a base de PLA, como PLA/PGA, PLA/PHBV, PLA/PCL, PLA/almidón, mostraron propiedades mejoradas para aplicaciones biomédicas. Junto con él, *Vert et al* [12], investigó el rendimiento de un stent bioabsorbible basado en PLA en el cuerpo humano mediante el control de la adhesión de proteínas (globulinas, fibrinógeno y albúmina). Se mejoró la hemocompatibilidad de las superficies en contacto con la sangre mediante el uso de un stent de PLA.

Además, *Gere et al* [13], Investigaron la reciclabilidad del PLA apto para botellas. Los resultados mostraron que el uso de compatibilizadores es eficaz para aumentar la estabilidad térmica del PLA para fabricar botellas.

Como se mencionó, las cualidades biodegradables del PLA lo hacen atractivo para la impresión, es por ello que *Carlos Díaz* [14] de la Universidad de la Laguna en España propuso una vía de reciclaje del PLA a partir de piezas impresas desechadas o defectuosas, diseñó probetas de material industrial y reciclado, para determinar si existe una significancia palpable entre filamentos, en lo que a su comportamiento mecánico se refiere, obtuvo que los valores promedio obtenidos para las probetas recicladas presentan una diferencia, inferiores, a las industriales, en resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, resistencia al cizallamiento y dureza. Por lo que la reutilización del PLA está recomendada por sus múltiples beneficios por su facilidad de procesamiento y por su coste económico, pero debe estar constantemente supervisada ya que presenta varias limitaciones en cuanto a propiedades mecánicas lo que limita en varias áreas su uso.

La impresión 3D con bobinas de PLA reciclado tiene como desventaja que el propio reciclaje de PLA afecta negativamente a las propiedades mecánicas en comparación con el material virgen, según *Lanzotti et al, 2019 [15]*, la primera vez que se recicla este material se obtienen propiedades similares al virgen, sin embargo, la tercera vez ya empieza a presentar fallos en los ensayos mecánicos. Es por eso que la opción de poder compatibilizar el PLA reciclado con material virgen para estudiar el avance en cuanto a propiedades mecánicas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

OG: Desarrollar y validar un proceso integral y avanzado de reciclaje de bolsas biodegradables de PLA, optimizando sus propiedades mecánicas y térmicas para aplicaciones en impresión 3D, moldeo por inyección y laminado. Este proyecto tiene como meta principal la creación de un material

reciclado de alta calidad que cumpla con los estrictos estándares de rendimiento requeridos en procesos de manufactura avanzada, promoviendo así la economía circular dentro de la industria de plásticos biodegradables.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos asociados al desarrollo de este trabajo investigativo son los siguientes:

OE1: Fabricar pellet a base de bolsas compuestas de PLA a través de un proceso de extrusión, entregadas por la empresa UNIBAG.

OE2: Crear dos tipos de bobinas para impresión 3D, considerando las mezclas con mejores resultados mecánicos.

OE3: Comprobar la factibilidad de poder realizar ensayos de impresión 3D con los filamentos de PLA, teniendo en cuenta las limitaciones del proceso y del material.

CAPITULO 2: Materiales y Métodos

2.1 Materiales

2.1.1 Ácido Poliláctico (PLA)

La mayoría de los materiales plásticos no son respetuosos con el medio ambiente y plantean importantes problemas ecológicos, como las emisiones de gases invernadero, resultantes de la fabricación y el uso de productos derivados del petróleo, considerando su naturaleza no biodegradable. Por lo tanto, los plásticos biodegradables se han convertido en uno de los materiales de filamento preferido en la impresión 3D, lo que podría presentarse como una solución a los temas ambientales con el uso de polímeros sintéticos.

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero termoplástico biodegradable y biocompatible, producido a partir de fuentes renovables como el almidón de maíz, las raíces de tapioca o la caña de azúcar. Es uno de los bioplásticos más utilizados debido a su capacidad para reducir las emisiones de CO_2 en comparación con los polímeros derivados de hidrocarburos. Aunque el PLA exhibe propiedades mecánicas destacables, presenta limitaciones significativas que restringen su uso en aplicaciones industriales. Entre estas limitaciones se incluyen su baja estabilidad térmica, limitada cristalinidad, insuficiente resistencia al impacto, baja temperatura de distorsión térmica y una capacidad de deformación restringida.

A pesar de estas limitaciones, el PLA sobresale entre los plásticos biodegradables por su gran potencial para sustituir a los plásticos convencionales, gracias a sus excelentes propiedades físicas y mecánicas. Este material puede adaptarse a diversas aplicaciones al formularse en versiones rígidas o flexibles y copolimerizarse con otros materiales. Además, su versatilidad permite procesarlo mediante diferentes métodos, como el moldeo por inyección, la extrusión de láminas y el moldeo por soplado, lo que amplía su viabilidad en la industria.

La biodegradabilidad del PLA es una característica clave tanto en la fabricación de bolsas reutilizables como en su uso en la impresión 3D, ya que permite reducir el impacto ambiental al final de su vida útil. Además, la huella de carbono del PLA es 3000 veces menor que la de algunos productos derivados del petróleo [17]. Sin embargo, su descomposición ocurre únicamente en condiciones específicas, donde microorganismos como hongos y bacterias colonizan la superficie del material y degradan el polímero en fragmentos más pequeños. Este proceso requiere la presencia de oxígeno, humedad y temperaturas elevadas, condiciones típicas de los sistemas de compostaje industrial, lo que limita su degradación en ambientes naturales. Las principales características de los polímeros PLA se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades generales de los polímeros PLA.

	Parámetro	Valor	Referencias
Propiedades físicas	Temperatura de transición vítrea	48 – 75 (°C)	[18]
	Temperatura de fusión	130 – 230 (°C)	[18]
Propiedades mecánicas	Resistencia a la tracción	52 – 82 (MPa)	[18],[19]
	Módulo de Young	3700 – 4100 (MPa)	[19],[20]
	Módulo de flexión	2392 – 4930 (MPa)	[18],[19]
	Resistencia a la flexión	48 – 110 (MPa)	[18],[19],[20]

2.1.2 Reciclaje mecánico de residuos de PLA [25]

La alta resistencia mecánica de piezas impresas en 3D con PLA virgen, en comparación a otros polímeros, ha sido ampliamente documentada en diversos estudios. Esto genera altas expectativas respecto a la utilización de PLA reciclado en aplicaciones de impresión 3D [21,22]. Según *Baechler et al* [23], la producción de materia prima reciclada (de piezas de impresión 3D posconsumo y fallidas) consume solo la mitad de energía requerida para fabricar materiales vírgenes.

Desde un enfoque sostenible, la materia prima reciclada posiciona a la impresión 3D como una tecnología valiosa para áreas remotas que no tienen acceso a materiales vírgenes o convencionales. Por lo tanto, la integración de impresión 3D con prácticas de reciclaje, desempeña un papel crucial dentro de los principios de la economía circular, al promover la reutilización eficiente de recursos y reducir el desperdicio.

El reciclaje de plástico se puede realizar a través de vías mecánicas y químicas; sin embargo, el reciclaje mecánico (MR, por sus siglas en inglés) es el más utilizado, debido a su capacidad de disminuir el consumo de materias primas y energía, además de reducir las emisiones asociadas a la producción de polímeros vírgenes. El MR implica el reprocesamiento de productos plásticos posconsumo mediante la recolección, separación, trituración, lavado, secado y extrusión, lo que da lugar a pellets. [24]

Actualmente, diversas empresas están explorando el uso de materia prima reciclada proveniente de desechos de impresión como fuente potencial para la fabricación de sus filamentos y así reducir el desperdicio de material. Esta práctica no solo contribuye a la disminución del desperdicio, sino que también puede reducir los costos de los materiales de impresión 3D, lo que a largo plazo se traduce en una disminución en el precio de las impresoras 3D.

Un ejemplo destacado es UNIBAG, una empresa que implementa un programa de recuperación posconsumo de bolsas reutilizables fabricadas con ácido poliláctico (PLA) derivado 100% del almidón de maíz. Estas bolsas cuentan con la certificación Biobased de DINCERTCO, que garantiza el uso de materias primas compostables y el cumplimiento de la Ley 21.100.

UNIBAG ha establecido puntos de acopio para recolectar sus bolsas usadas, que luego son destinadas a centros de compostajes industriales. En estas, las bolsas se descomponen en un plazo de 180 días, produciendo un compost rico en nutrientes, agua y aire, elementos esenciales para la fertilización natural de suelos y cultivos agrícolas.

La labor que realiza UNIBAG con su tratamiento de PLA post utilización es de gran relevancia para la economía circular. Extender el ciclo de vida de este material no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también fomenta un cambio en los hábitos de las personas hacia un modelo más consciente y responsable con el medio ambiente.

2.1.3 Glicerina

La glicerina desempeña un papel fundamental en la química verde gracias a su origen renovable y baja toxicidad, posicionándose como un componente clave en la elaboración de productos químicos sostenibles. Su uso no solo disminuye la dependencia de materias primas petroquímicas, sino que también contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo prácticas industriales más responsables y respetuosas con el medio ambiente.

Entre las propiedades más destacadas de la glicerina se encuentran su higroscopicidad, que se refiere a su capacidad para absorber agua del ambiente, y su plasticidad, la cual mejora la elasticidad y disminuye la fragilidad de los materiales. Estas características hacen que la glicerina sea especialmente útil como humectante en mezclas y compuestos, facilitando su procesamiento y aumentando la manejabilidad de los materiales durante operaciones como la extrusión.

De acuerdo con la investigación realizada por Cecilia Contreras en el Proyecto de Ingeniería Mecánica 2024-1 [25], se ha comprobado que la glicerina actúa como un humectante eficaz al facilitar el reprocesamiento de materiales durante la extrusión. Este efecto se atribuye a su propiedad higroscópica, que mejora la fluidez de las mezclas y reduce problemas como la formación de burbujas o irregularidades en el material.

En este contexto, la presente investigación propone la evaluación de diversas mezclas de PLA reciclado UNIBAG con diferentes proporciones de glicerina, como se detalla en el apartado 2.2.2. Estas mezclas buscan no solo optimizar el procesamiento del material, sino también explorar la posibilidad de mejorar sus propiedades mecánicas, como la elasticidad y la resistencia al impacto, con el objetivo de incrementar su viabilidad para aplicaciones en impresión 3D.

Tabla 2. Características y propiedades Glicerina.

Propiedades	
Densidad a 25°C	1,25 g/cm^3
Viscosidad a 20°C	1410 cP
Temperatura de ebullición	290 °C
Punto de congelamiento	17 °C
Gravedad especifica	>1,249
Solubilidad	Agua y alcohol

2.2 Procesos

La cadena de producción por la cual se generarán las bobinas de impresión está a cargo principalmente de un proceso de extrusión descrito en los subcapítulos siguientes. Precedente a eso, el PLA de trabajo, bolsas reutilizables vegetales de la empresa UNIBAG, serán recepcionadas en la empresa Cicla 3D de la ciudad de Concepción, donde se encargarán de trozarlas hasta hacerlas factibles de procesar en la maquinaría disponible en el laboratorio de la Universidad de Concepción.

2.2.1 Extrusión

La extrusión, en términos generales, es un proceso de transformación en el que un material es fundido y forzado a pasar a través de una boquilla, produciendo un objeto con una sección transversal constante y, en teoría, longitud indefinida. Este proceso se lleva a cabo en una extrusora, un dispositivo que utiliza uno o varios tornillos rotativos, conocidos como tornillos sin fin. La función principal de estos tornillos es transportar y comprimir el material dentro de un barril, impulsados por el torque generado por un motor. Cada una de ellas se puede ver en la Figura 1.

Se cuenta con 5 principios básicos:

1. Alimentación: Introducción del material en la extrusora a través de una tolva.

2. Plastificación: Calentamiento del material en la extrusora hasta llegar a su punto de fusión.

3. Avance: Transporte del material fundido a lo largo del tornillo giratorio.

4. Moldeo: Paso del material por una matriz para darle forma. Esta etapa se basa en el principio de deformación plástica.

5. Enfriamiento: Solidificación del material manteniendo la forma dada.

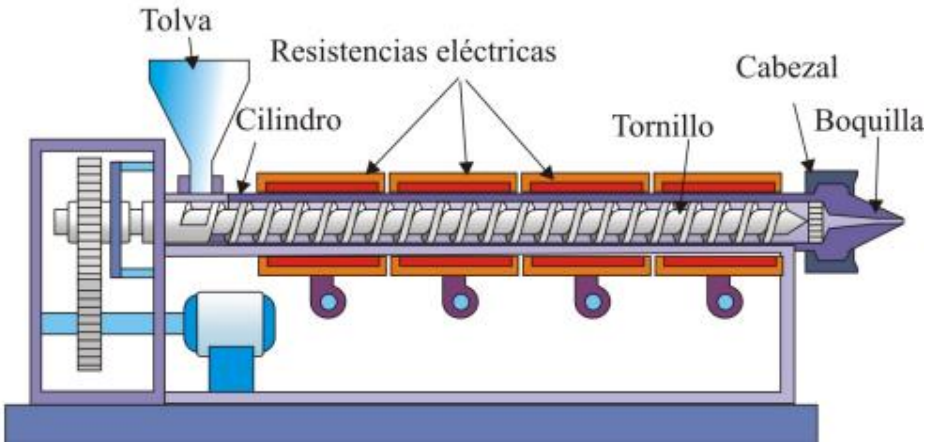


Figura 1. Esquema de una extrusora.
Fuente: [26]

Asimismo, un polímero necesita de 3 factores para poder ser extruido; tiempo, calor y presión. Aunque los 5 principios básicos del proceso de extrusión parezcan simples, la verdadera complejidad radica en los detalles técnicos. Factores como la velocidad del tornillo, la geometría de la matriz y la temperatura.

Es importante destacar que el cilindro de calefacción, que alberga en su interior los dos tornillos, cuenta además con sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se realiza mediante resistencias eléctricas distribuidas a lo largo del cilindro. Este está dividido en seis zonas de calefacción, cada una con control independiente, lo que permite mantener un gradiente de temperatura adecuado desde la tolva hasta la boquilla. Dicho gradiente se ajusta en función de los rangos de temperatura de fusión del material. En la Tabla 1 del apartado 2.1.1 se presentaron las principales propiedades del PLA.

Es fundamental respetar los rangos de temperatura, ya que las propiedades mecánicas y la procesabilidad del material dependen directamente de su comportamiento térmico. Si las temperaturas son demasiado altas, el material puede degradarse, lo que resultaría en fragilidad, emisión de gases y pérdida de propiedades mecánicas. Por otro lado, temperaturas demasiado bajas podrían causar una fusión incompleta, lo que aumentaría la presión interna de la extrusora y podría provocar obstrucciones en la boquilla.

En la Tabla 3 se detalla la configuración de temperaturas a utilizar en las seis zonas de calefacción, ajustadas de acuerdo con los datos de la Tabla 1. Mantener el material dentro del rango de temperatura de fusión adecuado permite un mejor control del flujo y garantiza que el PLA se extruya con la viscosidad correcta.

Tabla 3. Parámetros por utilizar en el proceso de extrusión.

Zonas	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Temperaturas[°C]	170	165	175	165	160	150

Una vez comenzado el proceso de extrusión, el filamento sale de la boquilla directo a una cama de agua que enfría y solidifica el material, para luego ser peletizado, en la Figura 2 se muestra el sistema interno de la peletizadora. Inicialmente cuenta con dos rodillos paralelos que arrastran el filamento por peso para hacerlo llegar a la herramienta de corte que se encarga de trozar el material de forma fina, el grosor con el que caen los pellets por la tolva del material depende de la relación de velocidades.

Figura 2. Sistema de funcionamiento de una picadora. Fuente: Propia.

El filamento conecta la extrusora con la peletizadora, y ambas máquinas deben estar sincronizadas en cuanto a sus velocidades de operación: la velocidad de salida del filamento y velocidad de giro de los cuchillos en la picadora. Encontrar la relación adecuada entre estas velocidades es crucial para mantener la continuidad del proceso. Si la diferencia entre ellas es demasiado grande, puede causar cortes irregulares en la longitud del material y reducir el grosor del filamento y por consiguiente de los pellets resultantes. En la Tabla 4 se presentan las velocidades recomendadas para utilizar en ambas máquinas.

Tabla 4. Velocidades del proceso.

Velocidad de extrusión [rpm]	110
Velocidad de peletización [rpm]	50

Es de esperar que una vez obtenidos los pellets estos se encuentren húmedos debido a su paso por la cama de agua para lograr su solidificación, por eso se someterán a un proceso de secado en un horno industrial del Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales de la Universidad. Se dispondrá el material en bandejas distribuidos de manera compacta, formando una capa uniforme de ellos. Según investigaciones, el PLA debe ser sometido entre 55 – 75 °C durante al menos 6 horas, dichos parámetros son propuestos para no modificar ninguna propiedad mecánica del material debido a su exposición a altas temperaturas a un periodo prolongado, considerando su temperatura de transición vítrea como la cuantificación limitante del proceso. Se espera que luego de ser secado, el material pierda cierto porcentaje en peso respecto a su inicial, que correspondería al agua contenida tanto en su interior como exterior.

2.2.1.1 Factibilidad económica

La finalidad de esta investigación no es solo comprobar los beneficios mecánicos de reutilizar PLA para impresión 3D, también poder comprobar la viabilidad económica de este, considerando los tiempos de producción, los recursos empleados y el consumo energético del proceso, este análisis permitirá establecer si el uso del PLA UNIBAG para la fabricación de pellets resulta competitivo en comparación con materiales vírgenes o comerciales disponibles.

En el catálogo de compra del sistema de extrusión de la marca BAOPIN mostrado en la Figura 3, se detalla que tanto la extrusora y peletizadora cuenta 380 V cada una, el sistema de extrusión es un sistema unificado, esto se refiere a que la extrusora puede funcionar de forma independiente a la peletizadora, pero en cambio la peletizadora no funciona sin que la extrusora esté prendida, es por ello que la magnitud del sistema se considerará como 760 V. Para poder tener el consumo eléctrico total del sistema, se deberá considerar el tiempo de producción de un kilo de pellets, en la Ecuación 1 se detalla el consumo.

$$Consumo\ electrico\ total\ [kWh] = Consumo\ electrico [kW] * Horas\ de\ producción \qquad (1)$$

Simultáneamente, se realizará un análisis de costos requeridos para el costo de producción de la ecuación 2, estos están divididos en fijos y variables, cada uno de ellos detallado según la empresa que provee el suministro eléctrico, en este caso CGE es la empresa encargada del laboratorio de la universidad. En el Anexo A se muestran las tarifas de suministro eléctrico a precio de estabilización 2022-1 de marzo de 2024.

La selección de cargos estará limitada por el tipo de tarifa que presenta el sistema, en este caso como la energía que se le suministra es inferior a 1000 V, se considerará como un servicio de baja tensión, por lo que se clasifica como BT2, una vez obtenido este dato la atención se concentrará en dichas columnas cruzadas con la fila por comuna de Concepción. En la Tabla 5 se muestran los costos fijos y variables que deberán ser considerados para el estudio económico.

Tabla 5. Costos para considerar según tarifa BT2.

Costos Fijos	
Cargo fijo mensual ($/cliente)	1046,93
Costos Variables	
Servicio de transmisión ($/KWh)	23,351
Servicio Público ($/KWh)	2,667
Cargo por consumo($/KWh)	110,224

Los costos variables deberán ser tratados como uno solo, es por ello que se realizará una suma de dichos tres términos obteniendo un Costo Variable Total, con este valor se aplicará la Ecuación 2, que muestra la formula final que se utilizará para calcular el costo monetario de la producción de un kilo de pellets.

$$Costo\ de\ producción = \ Costo\ Fijo + (Costo\ Variable\ Total * Consumo\ electrico\ total) \quad (2)$$

Con este análisis, se podrá determinar si la producción de pellets de PLA reciclado, bajo las condiciones establecidas, resulta económicamente viable para aplicaciones a pequeña o gran escala. Sin embargo, el costo de producción de los pellets no será el único aspecto económico por considerar en el proceso; es necesario también evaluar los costos de mano de obra. En este caso, se prevé la participación de un operador capacitada para operar el sistema de extrusión y que supervise la continuidad del proceso, la remuneración por hora para esta función será de $3.000.

Figura 3. Sistema de extrusión. Fuente:[27]

Utilizando las ecuaciones (1) y (2), junto con los datos presentados en la Tabla 5, también se realizará un análisis económico de la producción de filamento para impresión 3D durante un período de 1 hora. Este proceso se llevará a cabo utilizando el sistema de extrusión y bobinado Filabot de mesa, el cual está compuesto por tres componentes principales: la extrusora J35, la cama de aire y el bobinador. El consumo eléctrico de cada componente, según lo especificado en sus respectivos manuales de operación, es de; 450W para la extrusora, 550 W para la cama de aire y 100 W para el bobinador.

2.2.2 Fabricación de mezclas

Una vez obtenidos los pellets PLA reciclado se prepararán las mezclas necesarias para la inyección de probetas de tracción y así estudiar la variación de sus propiedades mecánicas en cada una de ellas. Esto nos entregaría una comprensión detallada de las contribuciones mecánicas de cada componente, permitiendo optimizar las mezclas para lograr un balance adecuado de propiedades según el requerimiento. Además, se espera que sea un punto clave para argumentar la viabilidad del uso de PLA reciclado y de glicerina como plastificante en términos de economía circular y funcionalidad.

En la Figura 4 se muestra las mezclas a realizar con diferentes niveles de concentración de PLA reciclado, PLA puro y Glicerina (GLI).

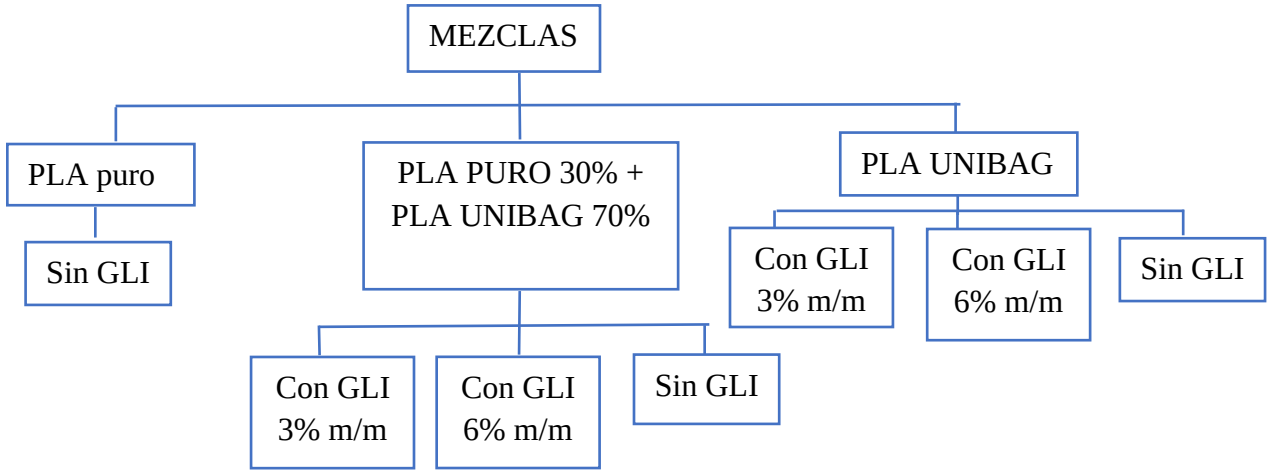


Figura 4. Mapa conceptual de las mezclas necesarias.

Las mezclas se realizarán a través de un proceso de extrusión, esto mejorará significativamente la formación de mezclas al aplicar calor y fuerza de cizalla al material, lo cual permite una dispersión homogénea tanto de la glicerina como del PLA reciclado en el PLA virgen. Esto evitará la aparición de concentraciones localizadas de plastificante que podrían debilitar ciertas áreas del material. Además, la combinación de calor y presión facilita una interacción molecular más fuerte entre los componentes, generando una estructura cohesionada a nivel molecular. Como resultado se espera obtener pellets uniformes, con una mezcla bien integrada, una distribución óptima de los componentes y propiedades mecánicas consistentes. Esto es clave, ya que una dispersión desigual podría afectar negativamente la rigidez y otras propiedades del material.

En la Tabla 6 se muestran los parámetros para utilizar en la extrusión de mezclas, esta vez se utilizará la línea de extrusión de mesa Filabot que cuenta sólo con tres zonas de calefacción como se muestra en la Figura 7, el sistema es explicado en detalle en el apartado 2.2.4. Dicha temperatura es inferior a los rangos propuestos para la extrusión del PLA reciclado esto se debe a que en su mayoría las mezclas presentan diferentes concentraciones de glicerina, por lo que unas temperaturas muy elevadas significarían acercar la glicerina a su punto de descomposición, afectando la estructura del PLA y a su vez velocidades muy altas calentarán la glicerina por fricción provocando su descomposición.

Tabla 6. Parámetros de extrusión de mezclas en sistema de mesa Filabot.

Zonas	**1**	**2**	**3**
Temperaturas [°C]	50	165	155
Velocidad [rpm]		15.1	

El PLA se caracteriza por ser un material altamente versátil, adaptable a diferentes formulaciones para cumplir con una variedad de especificaciones de productos. Sin embargo, esta versatilidad también lo hace sensible a la absorción de humedad. La glicerina, que se utiliza como plastificante en mezclas con PLA, es también higroscópica, lo que significa que absorbe agua del ambiente. La retención de humedad en la mezcla puede provocar degradación en el PLA durante el procesamiento, debido a su susceptibilidad a la hidrólisis: las cadenas moleculares del PLA se rompen en presencia de humedad y calor. Esto ocurre especialmente en procesos a altas temperaturas, como la extrusión o la inyección, donde la presencia de agua genera una degradación en el material, disminuyendo su peso molecular y afectando negativamente sus propiedades mecánicas, volviéndolo más frágil.

Además, el exceso de humedad en la glicerina reduce su efectividad como plastificante y puede agravar la degradación del PLA. Durante el procesamiento a alta temperatura, la evaporación del agua contenida en la mezcla puede causar defectos internos, como burbujas, que debilitan las propiedades del material y disminuyen tanto su resistencia a la tracción como su rigidez. A medida que el PLA se degrada, se vuelve más débil, menos rígido y más propenso a fallar bajo carga.

De forma preventiva, para evitar cualquier imprevisto se someterán todas las mezclas a un proceso de secado en un horno industrial del Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales de la Universidad, dicho horno se encontrará a 60°C durante 5 horas, dicha temperatura corresponde al límite de transición vítrea del PLA, esto ayudará a eliminar cualquier humedad residual en la mezcla, es de esperarse que el volumen de cada mezcla disminuya por la evaporación del agua. Una vez seco el material, para evitar nuevamente la rápida absorción de humedad del ambiente, cada mezcla será almacenada en bolsas categorizadas con bolsas de Silica Gel en su interior, esta es un desecante, un material que absorbe y retiene la humedad del aire que la rodea, esto asegurará que el material mantenga sus propiedades para los ensayos futuros.

2.2.3 Inyección

Para poder tener un estudio completo de las propiedades mecánicas del material, se fabricarán probetas con la inyectora manual modelo 150A de la empresa LNS technologies, mostrada en la Figura 5.

Figura 5. Inyectora. Fuente: [28]

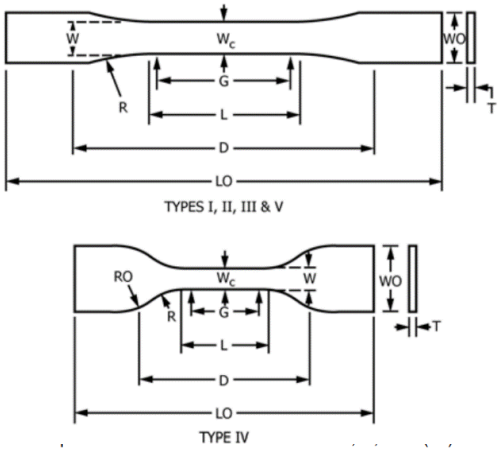
El proceso de moldeo por inyección se basa en dos principios: calor y presión; el material ingresa a la cavidad de inyección en donde es calentado cercano a su temperatura de fusión para que luego el tornillo empuje el plástico fundido hacía el interior del molde bajo alta presión, dicho molde es el que le define la forma al plástico, para que este pueda llenarse de forma completa, tanto el molde como el material deben encontrarse a la temperatura correcta, si cualquiera de estos se encuentra a bajas temperaturas el material dejará de fluir y generará un llenado incompleto de la matriz por su solidificación temprana.

Los parámetros que utiliza el Bench Plastic Injector se muestran en la Tabla 7, la temperatura de cámara es vital tenerla bajo control para evitar degradación de la glicerina, ya que es el elemento que presenta los limites más estrictos de procesamiento y la temperatura del molde debe facilitar la correcta solidificación sin generar un enfriamiento brusco que pueda causar tensiones internas en la pieza. Además, generar un calentamiento controlado del material al interior de la cámara para que este alcance una viscosidad adecuada y así facilitar el flujo, es por ello que se recomienda mantenerlo entre 3 a 5 minutos, excederse del límite podría generar que se funda el material.

Tabla 7. Parámetros de funcionamiento de la inyectora manual.

Especificaciones	
Temperatura de cámara	155 – 170 °C
Temperatura de molde	60 °C
Capacidad de cámara	18 gr
Sistema de enfriamiento	Agua
Modelo	Bench Plastic Injector

La calidad del producto resultante depende de varios atributos, como la geometría del producto, el material utilizado para la fabricación y los parámetros de mecanizado (parámetros del proceso). También es importante reconocer que entre mayor sea la temperatura utilizada, la calidad del relleno de fusión es mejor, la tensión interna del producto es pequeña y la calidad del aspecto es buena. El principal objetivo de este proceso de inyección es poder formar probetas para someterlas a ensayos de tracción y así estudiar las propiedades mecánicas del material. La matriz para utilizar será diseñada según la norma ASTM D638-14 utilizada para determinar las propiedades de tracción de los plásticos, en la Figura 6 se muestran los parámetros a definir en el diseño y especificaciones detalladas respectivamente, se diseñarán probetas tipo V para ser ensayadas.



Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV[B]	Type V[C,D]	
W—Width of narrow section[E,F]	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02)[B,C]
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02)[C]
WO—Width overall, min[G]	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO—Width overall, min[G]	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min[H]	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length[I]	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010)[C]
G—Gage length[I]	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5)[J]	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04)[C]
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Figura 6. Parámetros y características de probetas tipo V. Fuente: [29]

2.2.4 Fabricación de bobinas

La fabricación aditiva (AM), también conocida como impresión 3D, permite la fabricación de objetos totalmente personalizados con un alto nivel de complejidad geométrica y con una importante reducción del tiempo y del coste de fabricación. Entre los materiales utilizados para la AM, además de los metales y la cerámica, los polímeros se han convertido en un centro de interés para una amplia gama de aplicaciones. La versatilidad y adaptabilidad sintética, así como la amplia gama de propiedades de los materiales que pueden lograrse con polímeros, han convertido este tipo de materiales en los más empleados para las metodologías de AM. [30]

Para la fabricación de bobinas de impresión 3D se utilizará una línea de producción de Filabot, este cuenta con un extrusor J35, cama de aire y un Spooler, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Conjunto de extrusión y bobinado utilizado. Fuente: [31].

El pellet que se obtendrá tras realizar el proceso de extrusión descrito en el capítulo 2.2.1, volverá a ser sometido a extrusión, pero esta vez en un sistema de mesa conectado directamente a una enrolladora. La extrusora J35 cuenta con 3 zonas activadas por resistencias, la primera de ellas activará un ventilador una vez que el material alcance una temperatura promedio de 50°C para evitar la formación de una cama solida en la entrada al tornillo por alguna presencia de humedad, las otras dos zonas se encargan de calentar la cavidad del tornillo y la boquilla, a la salida de esta se conectará el filamento directamente con la enrolladora pasando a través de una cama de aire para enfriarlo hasta ser conectado en la Filabot Spooler, que se encargará de enrollar el filamento.

La impresión 3D está limitada por variaos parámetros según el tipo de filamento, pero también por características físicas del filamento, el diámetro es uno de ellos, se manejan filamentos con un diámetro de 1,75±0,05 mm, para ello se utilizará la impresora Creality Ender 3 V3.

La extrusora J35 está equipada con una boquilla diseñada para extruir filamento de 2,8 mm de diámetro, como se muestra en la Figura 8. Sin embargo, este tamaño de filamento no es utilizado actualmente ya que no entrega una buena precisión en piezas pequeñas o complejas. Por esta razón, se evaluará la posibilidad de reducir el diámetro del filamento a medida que pasa de la extrusora al mecanismo de bobinado. Este ajuste se consigue gracias al control de velocidades sus ruedas de

extracción en relación con la velocidad de extrusión del filamento, dichas ruedas comprimen el filamento conservando su calidad y se disminuirá gradualmente el diámetro sin interrumpir la continuidad del filamento durante su avance, y a su vez presenta también un mecanismo transversal variable para distribuir uniformemente el filamento en el carrete.

Con ello, existe la posibilidad de que no sea factible disminuir el diámetro directamente a la salida del extrusor, es por eso que se planteará la opción de rediseñar la boquilla de extrusión y así el filamento sea extruido directamente con el diámetro necesario y evitar posibles problemas en el proceso de impresión debido a un tamaño erróneo. Para ello se planea utilizar el Software de diseño Fusion 360 y lograr una pieza compacta desmontable que permita separar la boquilla de la base apernada a la extrusora, permitiendo así un fácil mantenimiento de ser necesario y tener la posibilidad de diseñar nuevas formas en la boquilla para proyectos futuros.

Figura 8. Boquilla de extrusión actual. Fuente: Propia.

2.2.5 Modelado por deposición fundida (FDM)

Una vez obtenidas las bobinas de impresión 3D PLA UNIBAG, se comenzará a realizar las pruebas de impresión 3D. El FDM es una forma de fabricación que emplea el principio de extrusión de la deposición de material para crear piezas tridimensionales. Este proceso utiliza un suministro continuo de un filamento termoplásticos desde un carrete para imprimir capas de material y construir la pieza. El filamento se somete a calentamiento desde un elemento calefactor alcanzando su estado semilíquido, para luego ser extruido a través de la boquilla sobre una plataforma, este material extruido no se solidifica inmediatamente, sino que se fusiona para formar una pieza apilada en capas a temperatura ambiente antes de solidificarse a través de la conducción y convección térmica.

Para comenzar el proceso es necesario utilizar un software de diseño para la creación del modelo 3D y luego ser transformado en un archivo de estereolitografía (STL) que es el legible en máquinas AM.

El software de corte se utiliza para definir los parámetros de impresión de las piezas, como el relleno, el espesor de la capa, la altura de la capa, la velocidad de impresión, el diámetro de la boquilla, etc.

En esta investigación se utilizará la impresora Ender 3 V3 SE, mostrada en la Figura 9 y descrita en la Tabla 8. Cuenta con una extrusora proximal "Sprit" compatible con plásticos como el PLA, PETG, TPU. Los parámetros más importantes para obtener una buena impresión son la temperatura de boquilla, temperatura de cama y tamaño de la boquilla, en este caso se utilizaron; 200°C, 50°C y 0,6mm, respectivamente.

Figura 9. Impresora Ender 3 Creality. Fuente: [32]

.

Tabla 8. Especificaciones de la Ender 3 V3

	Velocidad de impresión recomendada	Velocidad máxima de impresión	Aceleración	Precisión	Altura de capa	Temperatura de boquilla	Temperatura de la cama
Parámetros	180 mm/s	250 mm/s	2500 mm/s^2	$\pm$0.1mm	0.1-0.35mm	$\leq 260°C$	$\leq 100°C$

La calidad de la pieza producida está influenciada por la evolución térmica del proceso, es decir, a medida que una de sus capas se encoge (se enfría), idealmente debe hacerlo al mismo tiempo que la adyacente, un desfase de ello puede generar una mala unión entre dichas capas y ello llevará a una deformación conocida como rizado. Esta se puede solucionar reduciendo las tasas de enfriamiento o los gradientes de temperatura.

Los principales beneficios de la FDM son la simplicidad del proceso, la alta velocidad de impresión y la rentabilidad. Además, bajo términos de este estudio poder imprimir con el filamento PLA UNIBAG demostrará que tan factible resulta la reutilización de material en impresiones comerciales 3D. Este modelo de impresora acostumbra generalmente a trabajar con la impresión de 4 filamentos genéricos, cada uno de ellos presenta diferentes parámetros de impresión estandarizados, en la Tabla 9 se muestra la configuración internacional para los filamentos Creality, se considerarán solo los correspondientes a PLA más utilizados. [33]

Tabla 9. Parámetros de internacionales de filamentos.

Tipo de Filamento	**Hyper PLA**	**Generic PLA**	**Silk-PLA**
Temperatura boquilla [°C]	220	230	230
Temperatura cama [°C]	45	45	45
Velocidad de impresión óptima (altura de capa de 0,2 mm) [mm/s]	300	200	120
Volumen máximo caudal [mm³/s]	23	18	10
Modelo de enfriamiento	100%	100%	100%
Refrigeración auxiliar	80%	80%	80%

2.3 Ensayos

2.3.1 Tracción

Un ensayo de tracción consiste en aplicar un esfuerzo axial a una probeta hasta alcanzar su rotura, siendo una de las pruebas mecánica más utilizadas para caracterizar materiales. Este método permite determinar propiedades fundamentales como el módulo elástico, la resistencia a la tracción y la deformación máxima, entre otros valores característicos. Dependiendo del tipo de material o sector, el procedimiento puede variar en sus requerimientos, pero generalmente se lleva a cabo conforme a normas estandarizadas que aseguran la comparabilidad de los resultados.

En esta investigación, como se detalla en el apartado 2.2.2, se diseñará y fabricará una nueva matriz de probetas conforme a la norma ASTM D638. Esta normativa establece el procedimiento para determinar las propiedades mecánicas de tracción en plásticos, tanto reforzados como no reforzados, y es aplicable a materiales con un espesor de hasta 14 mm (0,55 pulgadas).

Los ensayos de tracción se realizarán utilizando la máquina Zwick Roell Z005, ilustrada en la Figura 10. Este equipo genera un ensayo cuasiestático, lo que significa que la carga aplicada aumenta de forma continua y suave, evitando impactos que puedan alterar la integridad de la probeta. Es

fundamental tener en cuenta que la velocidad de deformación debe ser baja para no distorsionar los resultados, lo que implica que la deformación no debe superar el 0,1 % por segundo. La máquina cuenta con una celda de carga de 5 kN y mide la deformación mediante el desplazamiento del cabezal, proporcionando datos confiables para el análisis mecánico del material. [37]

Figura 10. Máquina Zwick Roell Z005. Fuente: [34]

2.3.2 Calidad de impresión

Una vez obtenidas las bobinas y las propiedades mecánicas de las pruebas de tracción, se necesitará comprobar la calidad del material en la impresión. Para ello se utilizará la prueba “Benchy Boat” [35], prueba de precisión y calidad de impresión creada por Creative Tools, corresponde a un barco que pone a prueba las capacidades de impresión de detalles complejos, como voladizos, arcos y superficies inclinadas, mostrado en la Figura 12. Con esta impresión se pretende detectar problemas de calibración, como la temperatura de extrusión, velocidad de impresión, y calibración de los ejes. En la Tabla 9 se muestran algunos de los parámetros recomendados para la impresión del prototipo.

La calidad de impresión de un filamento 3D es un factor crucial para evaluar su funcionalidad y su adecuación para aplicaciones específicas. Determinar si el filamento reciclado es adecuado para impresión 3D no solo valida su capacidad para producir piezas de calidad comparable a las obtenidas con filamentos vírgenes, sino que también respalda su potencial como una opción sostenible. Para ello, en los siguientes apartados se proponen diversas formas de clasificar la calidad de un filamento.

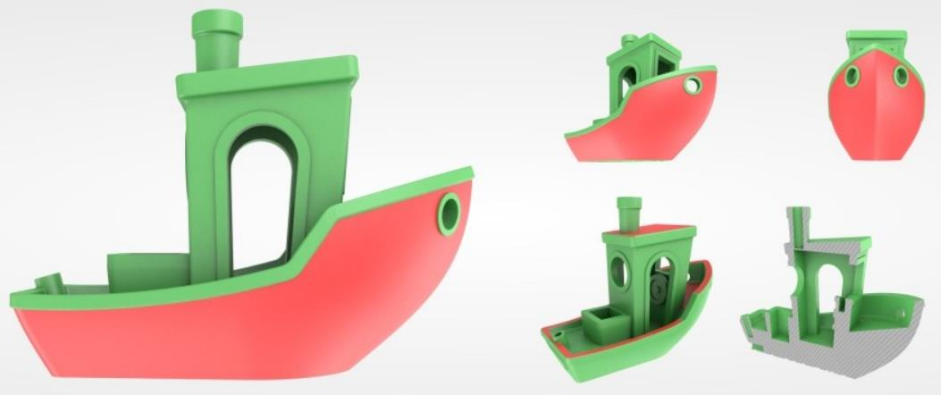


Figura 11. Benchy Boat. Fuente: [36]

Tabla 10. Parámetros recomendados.

Configuración	
Escala	1:1
Altura de capa	0,2 mm
Calidad	Estándar
Relleno	10%
Velocidad del extrusor	50%
Velocidad de impresión	150 mm/s

2.3.3 Índice de circularidad

El modelo incluye elementos con geometrías circulares, como la chimenea, el tubo de escobén y la ventana trasera del puente, cuyas dimensiones están ilustradas en la Figura 12. Para evaluar la calidad de impresión, se analizará la redondez de estos componentes, determinando cuánto se desvían de un círculo perfecto.

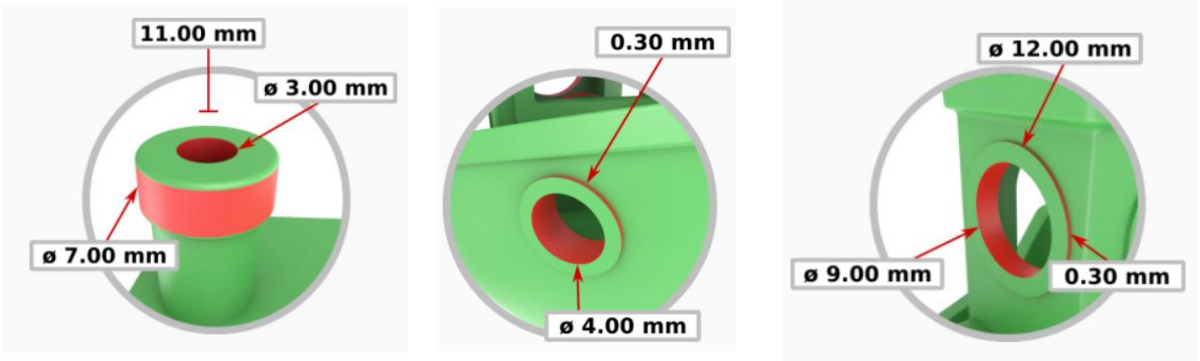


Figura 12. Elementos circulares del benchy boat. Fuente: [36]

La medición del diámetro se realizará en cuatro posiciones específicas, utilizando como referencia las posiciones de un reloj, tal como se detalla en la Figura 13. A partir de estos datos, se calculará la circularidad del objeto aplicando la Ecuación 3, lo que permitirá cuantificar la precisión geométrica del filamento reciclado en la impresión 3D.

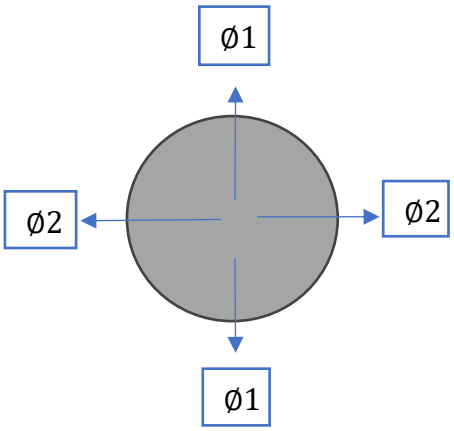


Figura 13. Referencia medición.

Si los diámetros medidos difieren significativamente entre sí, esto indicará que la pieza no es completamente circular y presenta una deformación ovalada. Un valor de C=0 indica una circularidad perfecta, mientras que valores mayores a 0 reflejan el grado de desviación respecto a la forma circular ideal. Este análisis no solo verifica si el diámetro es adecuado, sino también si el círculo presenta deformaciones.

$$C = \frac{Diámetro\ máximo - Diámetro\ mínimo}{Diámetro\ nominal} \qquad (3)$$

Para clasificar la impresión como de buena calidad, se considera aceptable un valor de C inferior a 0.5, lo que implica un margen de error menor a 1 milímetro en el diámetro impreso en comparación con el diseño original. Este criterio asegura la precisión geométrica necesaria para aplicaciones prácticas.

2.3.4 Test de voladizo

El diseño incluye varias superficies levemente inclinadas respecto a la horizontal, como se observa en la Figura 15. Estas inclinaciones pueden generar un efecto conocido como escalonamiento, que ocurre cuando el grosor de las capas impresas no se adapta de manera óptima a la inclinación de la superficie, lo que resulta en la formación de escalones visibles en la pieza.

Para evaluar los ángulos de inclinación, inicialmente se realizará una inspección visual en busca de imperfecciones evidentes. Se utilizará iluminación lateral para resaltar posibles escalonamientos y deformaciones en las superficies. Posteriormente, se aplicará una evaluación cuantitativa basada en un sistema de puntaje, según los criterios definidos en la Tabla 11, para determinar el grado de éxito en la calidad de impresión.

Tabla 11. Parámetros de evaluación.

Criterio	0	2	3	4	5
No se realizó el voladizo	X				
Geometría hecha, con stringing y relleno incompleto		X			
Superficie lograda, con hundimiento y acumulación de material			X		
Superficie completa, con escalonamiento				X	
Superficie lograda y sin defectos aparentes					X

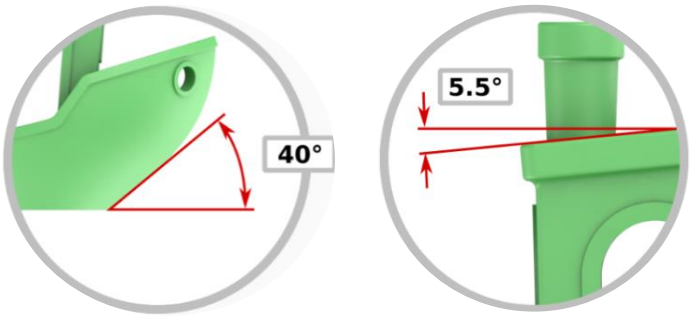


Figura 14. Elementos en voladizo. Fuente: [36]

2.3.5 Test de exactitud dimensional

Esto permitirá evaluar la capacidad de la impresora de producir piezas que se ajusten fácilmente a las especificaciones del modelo 3D, determinando el grado de desviación respecto a las dimensiones nominales. Para ello, se utilizará un pie de metro para medir longitudes en dos direcciones, X e Y, tomando como referencia los propios ejes de la impresora. En la figura correspondiente se presentan las dimensiones nominales del diseño.

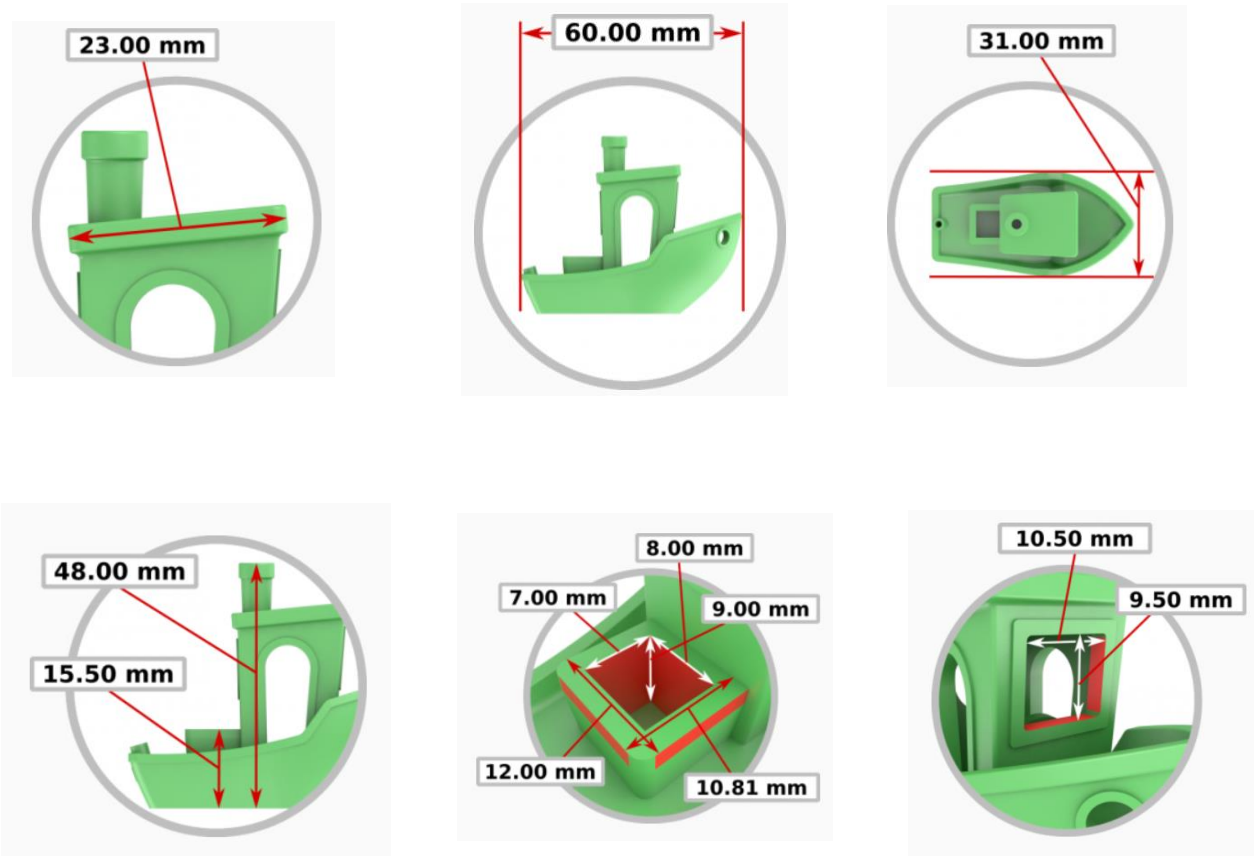


Figura 15. Dimensiones generales. Fuente: [36]

Se registrarán las mediciones realizadas y se calcularán las diferencias entre las medidas nominales y las reales. Posteriormente, se determinará la desviación porcentual para cada dimensión mediante la Ecuación 4.

$$Desviación\ porcentual = \frac{Medida\ obtenida - Medida\ real}{Medida\ obtenida}\ x\ 100 \qquad (4)$$

El signo de la resta en el numerador también tiene un significado importante: un valor positivo indica una desviación hacia abajo, lo que sugiere un sistema subdimensionado, mientras que un valor negativo señala una desviación hacia arriba, lo que indica un sistema sobredimensionado.

Para un sistema de impresión, normalmente se admite una variación en longitud de $\pm 1mm$, por lo que, aplicado a la ecuación, esto corresponde a una desviación porcentual máxima admisible de 4,34%.

CAPÍTULO 3: Análisis Fabricación Masterbatch

3.1 Resultados factibilidad económica

La extrusión del material reciclado resultó en la obtención de 2.239 gramos de pellets, como se muestra en la Figura 16. Para evaluar la viabilidad económica del proceso, se llevó a cabo un análisis de costos para la producción de un kilogramo de material peletizado. Este análisis tomó en cuenta un tiempo total de producción de 21 minutos, permitiendo determinar el costo asociado a cada etapa del proceso y su relación con el volumen de material producido.

Figura 16. Pellets PLA UNIBAG. Fuente: Propia.

Para la estimación del costo de producción se utilizaron las ecuaciones (1) y (2) y los datos extraídos del Anexo A. Concluyendo así que el gasto en consumo eléctrico asciende aproximadamente a $1.176,31 clp, y considerando la participación del operador, el costo de mano de obra suma $3.000 clp por hora de producción al costo previamente mencionado. En la Figura 18 se evidencia el sistema de cálculo utilizado para la determinación del costo.

Finalmente, el costo estimado de producción de un kilogramo de pellets reciclados de bolsas UNIBAG es de $4.176,31 clp, mientras que el precio de mercado del mismo producto se maneja a $2.500 clp más IVA, lo que da un total de $2.975 clp. Esto genera una diferencia inicial desfavorable de $1.201 clp entre el costo unitario de producción (CUP) y el costo unitario de mercado (CUM), sin embargo, esta diferencia puede ser absorbida dependiendo de la escala de producción, optimización de costos indirectos o beneficios derivados de la reutilización interna o venta adicional.

Para pequeñas empresas cuya actividad principal es el uso de los pellets en algún otro proceso productivo, es más rentable la compra del producto en el mercado. En cambio, para grandes industrias, ya sea para producción y comercialización o producción para post utilización del producto, implica una ventaja competitiva significativa como producción propia, ya que podría representar ahorros sustanciales, sobre todo en procesos industriales que requieren grandes volúmenes de material. Aunque la producción interna puede implicar un costo inicial más alto debido a maquinaria, personal o infraestructura, estos gastos pueden ser amortizados rápidamente debido al bajo costo de producción por unidad, siempre que el volumen de producción sea suficientemente alto.

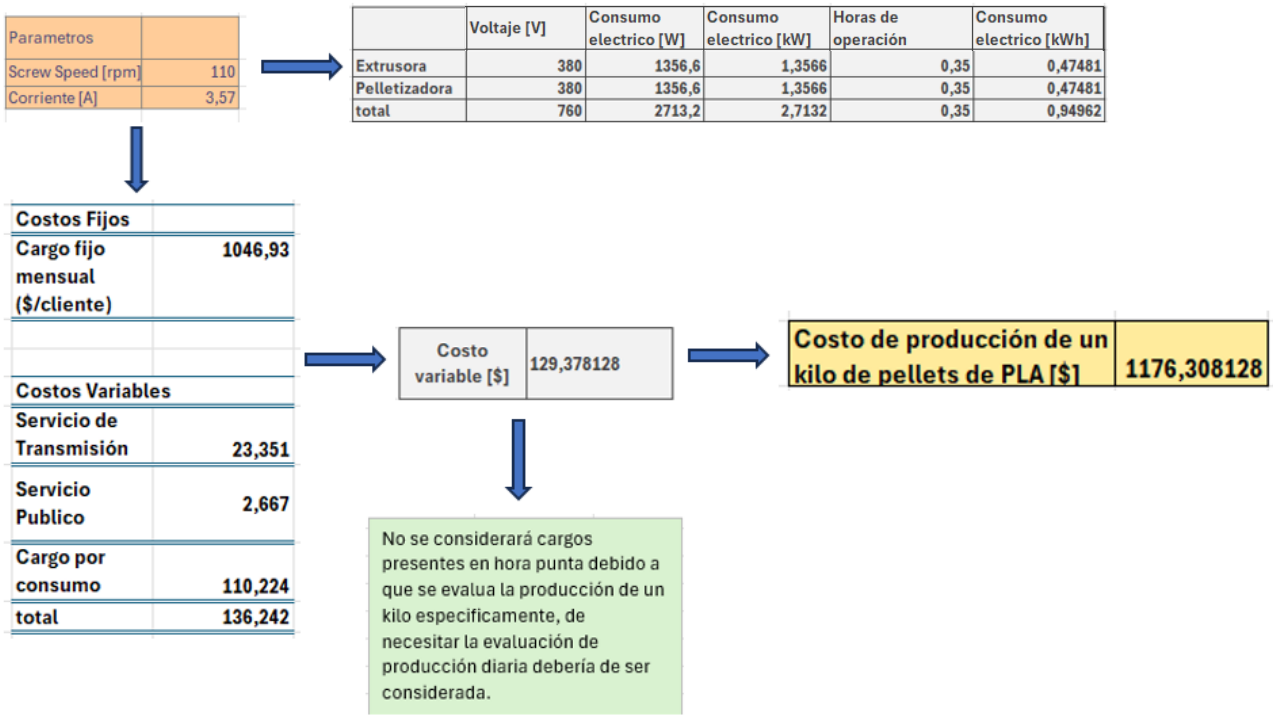


Figura 17. Esquematización del cálculo costo de producción. Fuente: Propia.

Este análisis de viabilidad económica se extendió a la fabricación de una bobina de impresión 3D (1Kg), estimándose un gasto de consumo eléctrico total de $2632,03 clp, al cual se adicionan $3.000 por la intervención de un operador con conocimientos en ingeniería. En la Figura 18 se detallan los datos considerados para el cálculo.

En el mercado, el kilo de filamento de impresión de Pla circula por un valor de entre $11.00 a $12.000 clp, mientras que el de PLA reciclado rodea los $18.000 a $20.000 clp, esto producto a la falta de productores en el área de materiales reciclados.

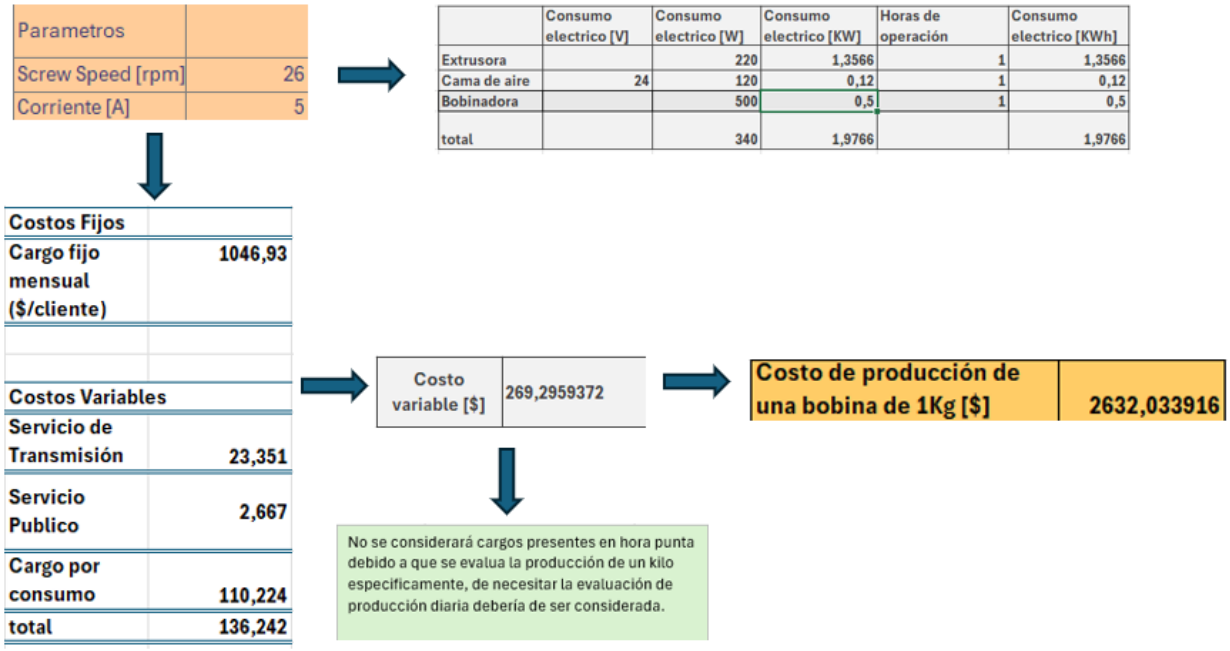


Figura 18. Esquematización del costo de producción. Fuente: Propia.

El costo de fabricación asciende a $5.632 clp aproximadamente, lo que es sumamente inferior al costo de mercado. Este costo representa un margen de ahorro del 71,84% al fabricar el filamento de manera interna. El principal obstáculo para la fabricación interna de filamento es la inversión inicial en maquinaria y la obtención de la materia prima, bolsas UNIBAG.

Es por esto que la producción interna de bobinas se recomienda para grandes empresas que cuenten con el capital para adquirir la materia prima (bolsas UNIBAG), de lo contrario, el costo ascendería demasiado y dejaría de ser factible el poder producirlo.

Entonces, producirlo representa una alternativa económicamente viable para la empresa UNIBAG, considerando que ellos cuentan con centro de reciclaje de sus propias bolsas y que a su vez cuenta con la capacidad de generar una inversión inicial para la maquinaria. La disponibilidad de materia prima interna, combinada con los altos precios comerciales del filamento en el mercado, hace que esta opción sea especialmente rentable. Además, la implementación de esta iniciativa refuerza el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y podría abrir nuevas oportunidades de negocio.

3.2 Resultados mecánicos probetas inyectadas

Preliminarmente, se refabricó la matriz de inyección para las probetas de tracción, en el Anexo B se muestran los nuevos planos de fabricación. Se elaboraron 7 diferentes mezclas y con ellas 21 probetas a través de un proceso de inyección, mostradas en la Figura 19, cada una de ellas fue ensayada en tracción para el estudio de propiedades mecánicas; Módulo elástico (E), Resistencia (σ_M) y Deformación (ε_M) máximas. Evaluar estas tres propiedades nos da una idea clara de la rigidez,

resistencia y ductilidad de las mezclas, lo que es fundamental para entender como responden las mezclas de PLA bajo carga y determinar su aplicabilidad en productos de ingeniería o impresión 3D.

Figura 19. Probetas inyectadas. Fuente: Propia.

En la Tabla 12 se muestran los valores promedios entre pares de mezclas, para dar facilidad a la comparación de valores obtenidos. En el Anexo C: Curvas Esfuerzo - Deformación, es posible ver de manera detallada cada una de las curvas características por cada mezcla ensayada.

Tabla 12. Resultados de los ensayos de tracción.

	Modulo Elástico [MPa]	**Resistencia Máxima [MPa]**	**Deformación Máxima [mm]**
Pla Unibag	752,88	53,74	0,07092
Pla Unibag + 3% Gli	669,23	39,71	0,05994
Pla Unibag + 6% Gli	675,19	26,52	0,03818
70% Pla Unibag + 30% Pla Puro	646,48	26,51	0,04069
70% Pla Unibag + 30% Pla Puro + 3% Gli	628,91	31,80	0,04988
70% Pla Unibag + 30% Pla Puro + 6% Gli	581,85	24,55	0,04219
Pla Puro	1121,64	67,21	0,08561

Los valores obtenidos corresponden a una comparación entre esfuerzo deformación, los datos obtenidos del programa de medición fueron ajustados, con la intención de eliminar los errores de medición referidos a la calibración de la máquina en su inicio. Con esto se quiso disminuir lo más posible el riesgo de la propagación de errores respecto a los valores medidos, ya que estos conllevarían a errores con respecto a las propiedades mecánicas del material.

3.3 Discusiones de propiedades mecánicas y efecto de la glicerina

La glicerina es utilizada comúnmente como plastificante, con ella se buscó reducir la rigidez del material y aumentar su ductilidad a través de la unión química de sus enlaces. Hablar de ductilidad y rigidez es hablar sobre la deformación de los materiales y su condición de fluencia; referida a la deformación permanente y a la deformación elástica, respectivamente. Un objeto rígido puede ceder cuando se deforma lo suficiente, esto está determinado por su ductilidad o la falta de ella.

Es sabido que el PLA reciclado tiende a perder propiedades mecánicas debido a la degradación térmica y la pérdida de plastificantes durante su procesamiento, es por eso que la adición de glicerina podría ayudar a compensar esas pérdidas. Debido a la estructura química del PLA y de la Glicerina, respecto a sus grupos polares, ambos materiales son compatibles, por lo que su interacción entre ambas fases ayuda a la mejora de ciertas propiedades, como la capacidad de resistir tensiones internas sin fracturarse.

Para efectos de esta investigación sobre filamentos de impresión 3D, poder encontrar un equilibrio entre rigidez y flexibilidad es de suma importancia, este balance impacta directamente en las propiedades mecánicas, ya que el proceso de reciclaje puede alterar su estructura molecular, afectando sus propiedades intrínsecas. Incorporar aditivos como glicerina o realizar mezclas con PLA virgen, como se hizo, es una estrategia clave para ajustar este equilibrio. Según *Anderson [37]* que realizó una investigación para evaluar las propiedades mecánicas de PLA virgen y reciclado, dio como resultado una disminución del 10,9% en la resistencia a la tracción y una disminución del 2,4% en la dureza, cuando se utilizó material reciclado. *Pinho et al.* [21] también observaron una resistencia a la tracción un 32% menor y un módulo de elasticidad un 29% menor. *Alexandre et al.* [38] y *Lee et al.* [39] también observaron una tendencia decreciente en la resistencia a la tracción en un 12,57% y un 17%, respectivamente. Por el contrario, *Pernica et al.* [40] evaluaron una mayor resistencia a la tracción para PLA reciclado que para PLA virgen y afirmaron que los pasos de procesamiento para la producción de filamentos fueron la principal razón del aumento.

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos de tracción realizados en la universidad, presentados en la Tabla 12, y las propiedades del PLA virgen indicadas en la Tabla 1, se realizó una comparación numérica de los valores del módulo de elasticidad y la resistencia máxima a la tracción. Los análisis revelaron que la mezcla compuesta por 100% de PLA reciclado presentó una reducción del 67,12% en su módulo elástico, aunque su resistencia a la tracción está dentro de límites correctos. Por otro lado, la mezcla conformada por 70% de PLA reciclado y 30% de PLA virgen mostró una disminución del 42,36% en el módulo elástico y una reducción del 49,01% en su resistencia a la

tracción. Estos resultados destacan las diferencias significativas en las propiedades mecánicas entre las distintas formulaciones evaluadas.

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran una disminución mucho más pronunciada, al menos en PLA 100% reciclado, en las propiedades mecánicas del PLA reciclado en comparación con lo reportado en estudios previos, lo que sugiere que factores adicionales podrían estar impactando negativamente en las formulaciones evaluadas.

Estas diferencias significativas podrían atribuirse a factores específicos del proceso de reciclaje, tales como una degradación térmica excesiva, variaciones en el grado de polimerización del PLA reciclado, o la presencia de contaminantes en el material reciclado que afectan su integridad molecular.

Es importante destacar que las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción presentan valores consistentemente bajos, especialmente en lo que respecta al módulo elástico, que no mostró mejorías significativas al trabajar las mezclas. Aunque la adición de glicerina no contribuyó a mejorar las propiedades mecánicas, sí optimizó el procesamiento del material. Durante la extrusión, la presencia de glicerina permitió un flujo más uniforme a través de los tornillos de la extrusora. El equipo de la marca BAOPIN, al contar con un recorrido más largo para el material, garantizó un calentamiento más controlado, evitando problemas como taponamientos en la boquilla y mezclas incompletas, logrando una extrusión constante y eficiente. En contraste, la extrusora J35, al tener un recorrido más corto y un calentamiento más brusco, presentó mayores dificultades durante el mezclado. En este contexto, la glicerina desempeñó un rol crucial como agente humectante, mejorando el deslizamiento del material a través de los tornillos y la boquilla, reduciendo los taponamientos y produciendo un filamento más uniforme y con un acabado superficial más brillante.

Ahora bien, se trabajaron varias hipótesis sobre el fracaso en la adición de la glicerina en cuanto a sus propiedades mecánicas;

-Dilución del material base (PLA UNIBAG): Al generar la mezcla de PLA reciclado con glicerina o con PLA virgen, se disminuyó la proporción de PLA puro en la mezcla, esto pudo haber debilitado la estructura general del material porque la glicerina actúa como plastificante, lo que aumenta la ductilidad, pero disminuye la rigidez (reflejada en un menor módulo elástico). Además, el PLA virgen pudo haber tenido propiedades diferentes, como menor Resistencia o rigidez, si es que fue procesado bajo condiciones distintas.

-Compatibilidad y dispersión de la glicerina: Si la glicerina no se dispersó de manera homogénea durante la extrusión, puede haber creado zonas débiles en las probetas. Esto ocurre porque la glicerina, al no ser completamente miscible con el PLA, puede formar fases separadas que actúan como puntos de estrés, reduciendo la resistencia y el módulo del material.

-Contenido óptimo de plastificante: Aunque la glicerina mejora la ductilidad, su uso tiene un límite óptimo. Más allá de un cierto porcentaje, los plastificantes pueden debilitar la matriz polimérica, reduciendo las fuerzas intermoleculares entre las cadenas de PLA e incrementar la movilidad de las cadenas poliméricas, lo que disminuye las resistencias y la rigidez. Es posible que las mezclas con 3%

y 6% de glicerina, el contenido del plastificante haya sobrepasado el punto en el que proporciona un beneficio mecánico, y en lugar de mejorar las propiedades, las degradó.

-Degradación térmica durante el procesamiento: El PLA es sensible a la temperatura, y cada ciclo de procesamiento, como la extrusión e inyección, puede degradarlo. Al mezclar PLA reciclado con virgen y glicerina, es posible que el reciclado haya sufrido más degradación térmica, afectando las propiedades de la mezcla final y su vez, que la glicerina haya catalizado la degradación térmica del PLA, especialmente si hubo humedad residual.

-Falta de interacción química fuerte entre PLA y glicerina: Aunque la glicerina es polar y puede interactuar con el PLA, esta interacción no genera enlaces químicos fuertes, por lo tanto, la glicerina actúa como un agente externo que podría debilitar la estructura cohesive del PLA, reduciendo la resistencia mecánica, en cambio en el PLA reciclado puro, la red molecular no se ve interrumpida, lo que podría explicar sus valores más altos.

A raíz de los análisis logrados, el PLA reciclado puro probablemente mantuvo sus propiedades originales debido a una mayor cristalinidad, ausencia de plastificantes y menor degradación durante el procesamiento. En cambio, las mezclas con glicerina y PLA virgen diluyeron la matriz de PLA reciclado y pudieron reducir las propiedades mecánicas debido a factores como la dispersión de glicerina, interacción química limitada y degradación térmica.

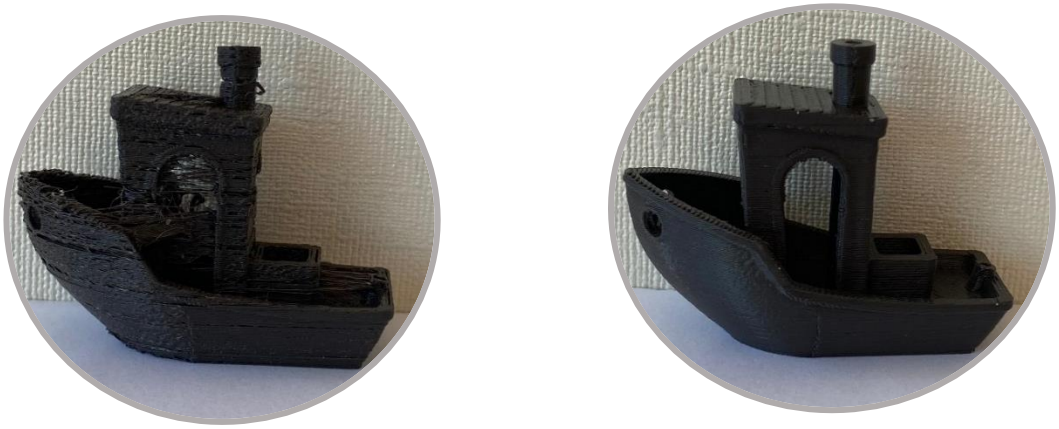
CAPITULO 4: Resultados impresión 3D

4.1 Resultados de la calidad de impresión

Los filamentos obtenidos, cuyo diámetro promedio varía entre 1,6 - 1,75 mm, lo que los hace compatibles con la impresora Ender 3 V3. Este resultado se logró gracias al rediseño de la boquilla de extrusión, descrito en el apartado 2.2.4, cuyos planos se incluyen en el Anexo D. La boquilla está diseñada para extruir el material con un diámetro constante de 1,75 mm. Con estos filamentos, se imprimió el modelo conocido como "Benchy Boat", un diseño disponible en la página oficial del modelo [36].

Figura 20. Filamento fabricado. Fuente: Propia.

En la figura 21 se presentan las dos impresiones de "Benchy Boat" hechas con diferentes mezclas: una compuesta únicamente por PLA UNIBAG y otra con una combinación de 70% PLA UNIBAG y 30% PLA virgen. Estas mezclas fueron seleccionadas con base en los resultados de sus propiedades mecánicas, detallados en la Tabla 12. Dado que ambas demostraron un buen desempeño en los ensayos de tracción, se esperaba que también ofrecieran un comportamiento adecuado en la impresión 3D.



a) b)

Figura 21. Benchy Boat. a) Filamento 100% pla unibag, b) Filamento 70% pla unibag y 30% pla virgen. Fuente: Propia.

4.2 Índice de circularidad

Para evaluar la calidad de impresión de ambos filamentos, se analizará la redondez de sus componentes, en la Figura 22 y 23 se presentan los diámetros obtenidos en cada elemento circular con ambos filamentos, los subíndices e) representa diámetro circulo externo, mientras que el i) diámetro circulo interno;

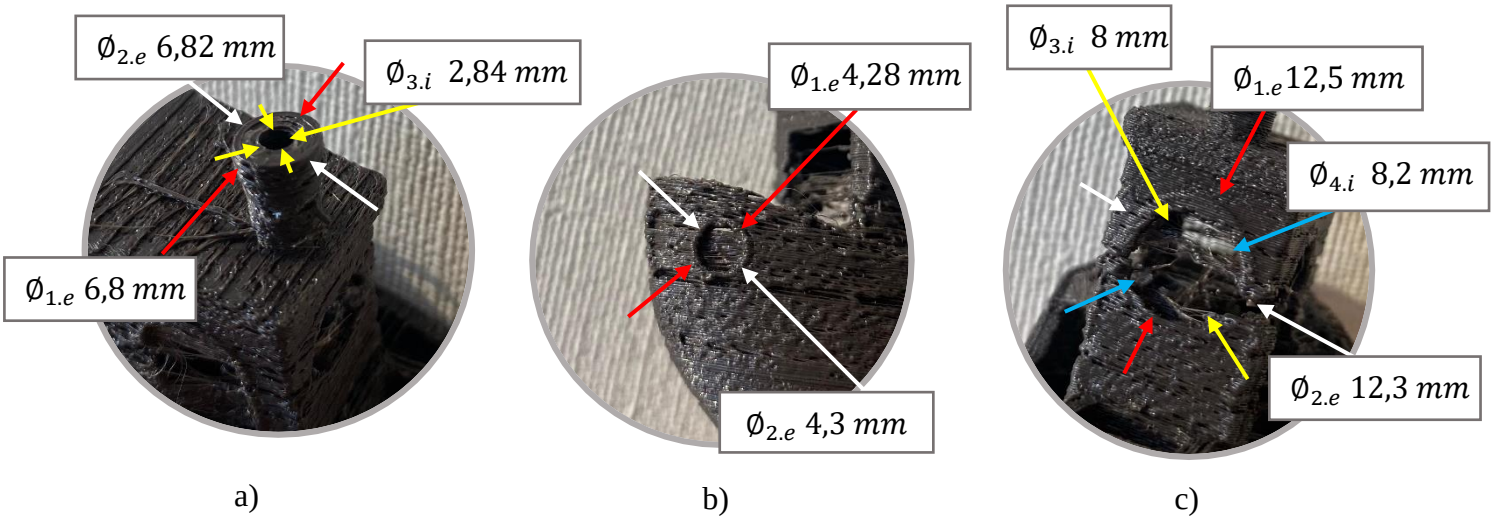


Figura 22. Medidas circulares del modelo impreso con PLA 100% UNIBAG. a) Redondez de la chimenea, b) Diámetro del tubo de escobén, c) Tamaño de la ventana trasera del puente. Fuente: Propia.

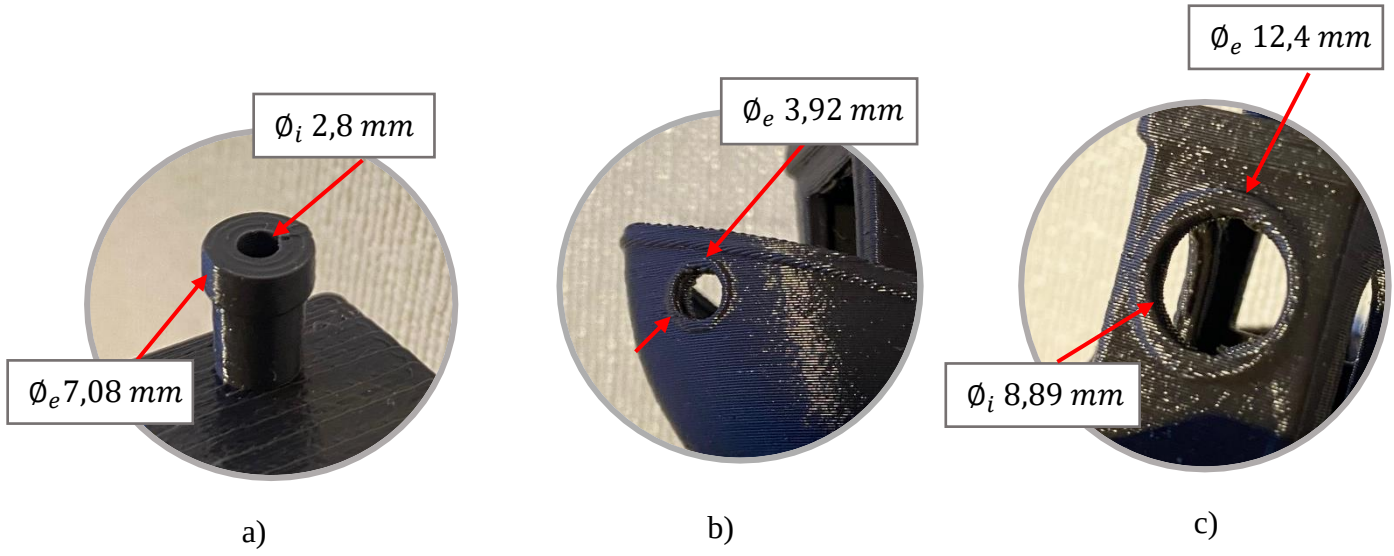


Figura 23. Medidas circulares del modelo impreso con 70% PLA UNIBAG y 30% PLA VIRGEN. a) Redondez de la chimenea, b) Diámetro del tubo de escobén, c) Tamaño de la ventana trasera del puente. Fuente: Propia.

Las imágenes presentan más de una medición de diámetro en el mismo elemento circular para poder calcular el índice de circularidad con la ecuación (3), los resultados se presentan en la Tabla 13:

$$C = \frac{Diámetro\ máximo - Diámetro\ mínimo}{Diámetro\ nominal} \quad (3)$$

Tabla 13. Resultados índices de circularidad por filamento.

		Índice de circularidad 100% UNIBAG	**Índice de circularidad 70% UNIBAG y 30% virgen**
Chimenea	Circulo externo	0,0028	0
	Circulo interno	0	0
Tubo de escobén	Circulo externo	0,005	0
Ventana trasera del puente	Circulo interno	0,02	0
	Circulo externo	0,016	0

Los resultados obtenidos muestran que el filamento compuesto por 70% PLA UNIBAG y 30% PLA virgen presentó un desempeño significativamente superior en términos de circularidad, con índices iguales a cero en todos los casos evaluados. Esto indica que las geometrías circulares impresas lograron una circularidad perfecta. Sin embargo, cabe destacar que esto no implica que las dimensiones obtenidas coincidan exactamente con las especificaciones del diseño 3D, ya que se observan variaciones milimétricas en los diámetros respecto al modelo original. A pesar de ello, este resultado evidencia que el filamento ofrece una excelente precisión en la impresión de elementos circulares. En contraste, el filamento de 100% PLA UNIBAG presentó la mayoría de sus índices diferentes de cero, siendo el círculo interno de la ventana trasera del puente el más afectado, con una desviación de hasta un milímetro respecto a la medida nominal. Este comportamiento se atribuye a la rugosidad constante observada en el modelo impreso.

4.3 Test de voladizo

En las Figuras 24 y 25, se muestran las superficies inclinadas que se obtuvieron con cada filamento;

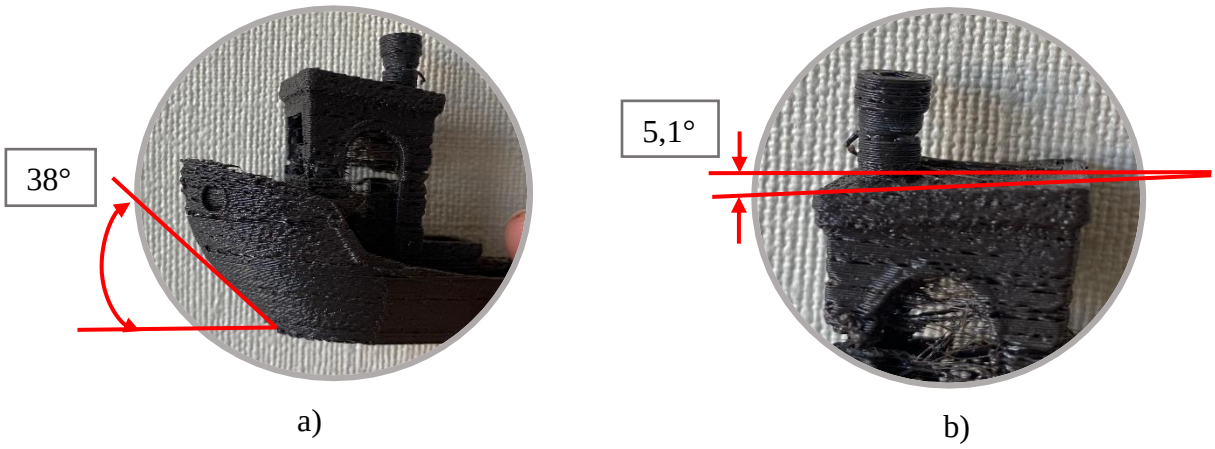


Figura 24. Inclinaciones del modelo impreso con PLA 100% UNIBAG. a) Inclinación del voladizo de proa, b) Inclinación del techo del puente. Fuente: Propia.

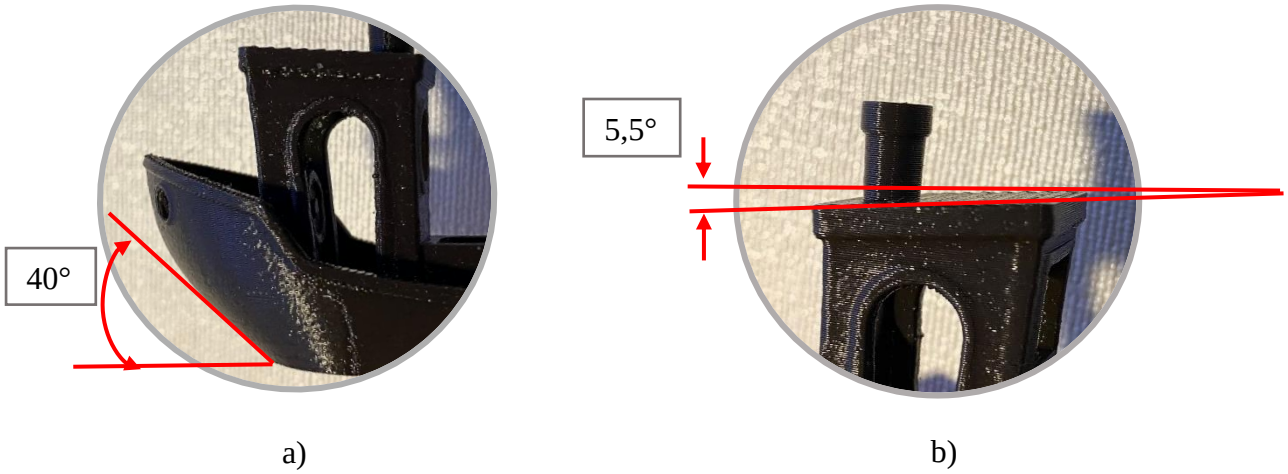


Figura 25. Inclinaciones del modelo impreso con 70% PLA UNIBAG y 30% PLA VIRGEN. a) Inclinación del voladizo de proa, b) Inclinación del techo del puente. Fuente: Propia.

Este análisis se realizó de manera cuantitativa utilizando la Tabla 11. El filamento 100% obtuvo un total de 3 puntos debido a que logró la superficie, pero presentó hundimiento y acumulación de material, esto se debe a que la impresión presentó escalonamiento en sus capas, esto lo más probable es que se haya generado por la inestabilidad diametral del filamento. En contraste, el filamento 70%-30% obtuvo un total de 5 puntos porque logró sin dificultad ni variación alguna las medidas del diseño propuesto. Esto lleva a confirmar que este último filamento responde mucho mejor a la impresión de

superficies inclinadas, lo que lo hace útil para muchas más aplicaciones que el primer filamento mencionado.

4.4 Test de exactitud dimensional

Una vez obtenidas las dimensiones de cada impresión, se determinó como cada uno de los filamentos se ajusta a las especificaciones del modelo 3D, para ello se ocupó la formula (4) presentada en el capítulo 2.

$$Desviación\ porcentual = \frac{Medida\ nominal - Medida\ real}{Medida\ nominal} x\ 100 \qquad (4)$$

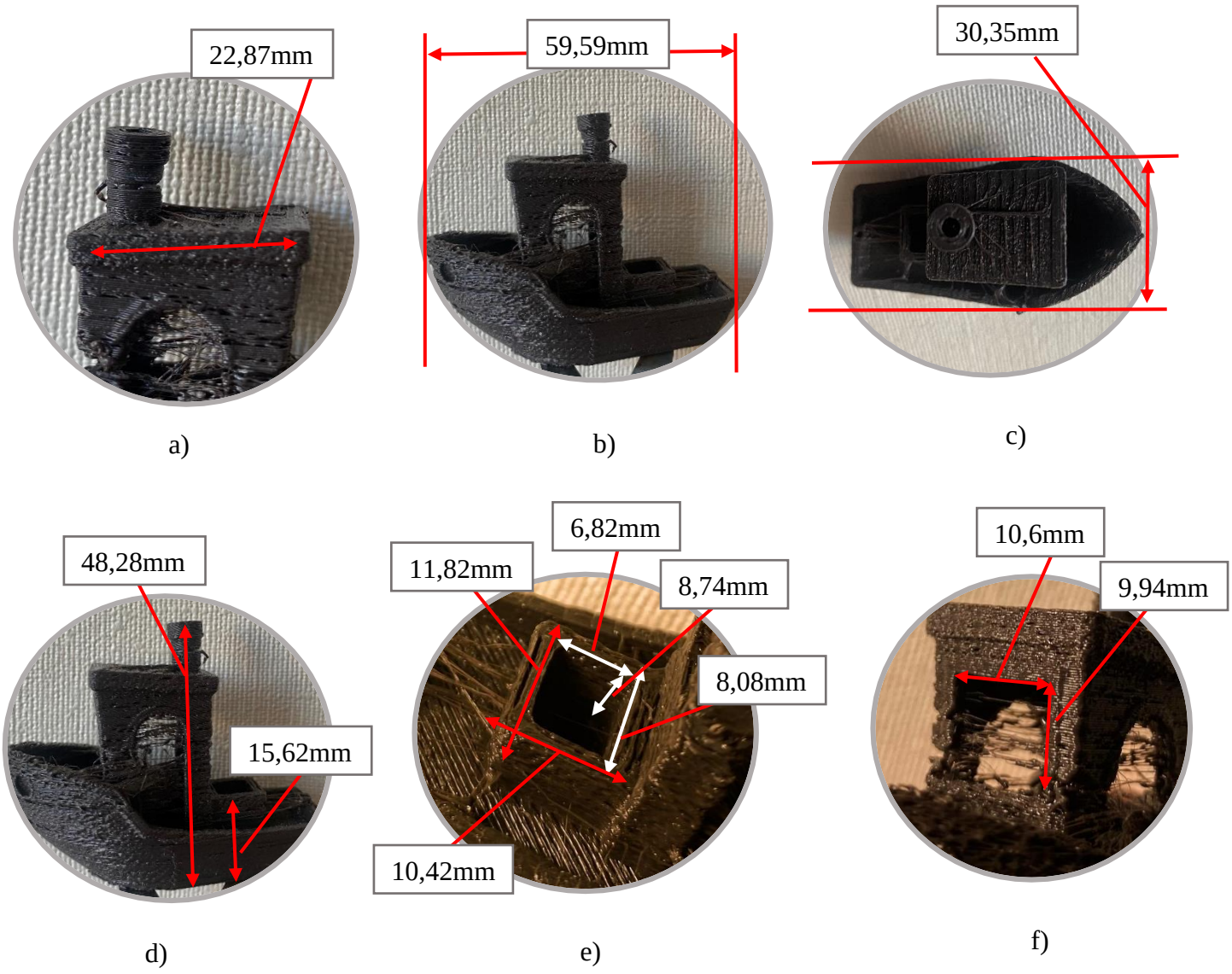


Figura 26. Dimensiones del modelo impreso con PLA 100% UNIBAG. a) Longitud del techo del puente, b) Longitud total horizontal, c) Ancho total horizontal, d) Altura total vertical, e) Tamaño de la caja de carga, f) Tamaño de la ventana frontal del puente. Fuente: Propia.

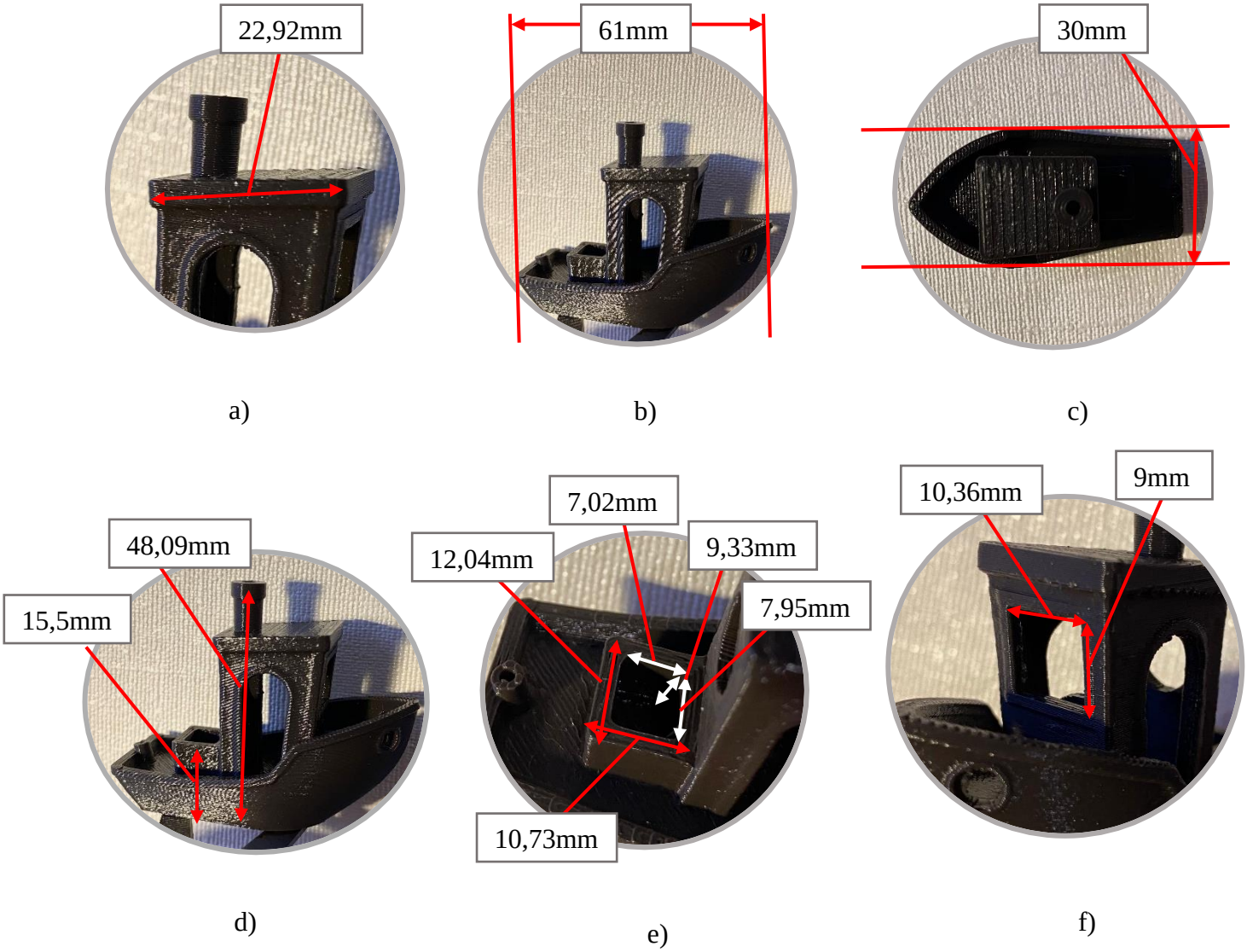


Figura 27. Dimensiones del modelo impreso con 70% PLA UNIBAG y 30% PLA VIRGEN. a) Longitud del techo del puente, b) Longitud total horizontal, c) Ancho total horizontal, d) Altura total vertical, e) Tamaño de la caja de carga, f) Tamaño de la ventana frontal del puente. Fuente: Propia.

Tabla 14. Desviaciones porcentuales.

	Desviación porcentual filamento 100% PLA UNIBAG	**Desviación porcentual filamento 70% PLA UNIBAG y 30% PLA VIRGEN**
Longitud techo del puente	0,56%	-0,34%
Longitud total horizontal	-0,68%	1,6%
Ancho total horizontal	-2,09%	-3,2%
Altura total vertical	0,67%	0,09%
Tamaño de la caja de carga	-4,15%	1,12%
Tamaño de la ventana frontal del puente	2,79%	-3,28%

La fórmula utilizada comparó la medida obtenida en la impresión con la medida real del modelo 3D para cuantificar la desviación en términos porcentuales. La magnitud de la desviación porcentual, independientemente del signo, indica el grado de diferencia entre la medida obtenida y la real. Valores más cercanos a 0% indican una mayor precisión dimensional en la impresión.

Un signo positivo significa que la pieza impresa es más pequeña de lo que debería ser según el diseño original, esto se puede deber principalmente a una contracción demasiado rápida del material durante el enfriamiento o también una falta de precisión en el suministro del filamento o variaciones en el flujo del extrusor, esta última directamente relacionada con la constante variación diametral del filamento, al tener esta deficiencia la cantidad de material depositada en cada capa no es la misma.

Un signo negativo significa que la pieza impresa es más grande de lo diseñado, esto puede ser causado por sobrealimentación de material por el extrusor (over-extrusion) o también deformaciones del material durante la impresión, como hinchazón debido a altas temperaturas, esta última es la causa más común, sobre todo en piezas que cuentan con medidas más pequeñas de lo común, se debe tener conocimiento de la variación de temperaturas útiles en el modelo.

Analizar los signos y las magnitudes de las desviaciones porcentuales permite identificar patrones y correlacionarlos con factores como la composición del filamento, las condiciones de impresión (temperatura, velocidad), o incluso el diseño de la impresora. Esto es crucial para evaluar el desempeño de cada filamento y optimizar el proceso de impresión para lograr piezas con mayor exactitud dimensional.

4.5 Discusiones calidad de impresión y geometría del filamento

En comparación con los polímeros derivados del petróleo, el reciclaje de los residuos de PLA no es sencillo debido a su sensibilidad a la degradación térmica y la hidrólisis [41]. Es necesario un control cuidadoso del proceso de reciclaje durante la MR para evitar la degradación de las propiedades [42]. Referido a esto y a los resultados de impresión realizadas en el capítulo anterior, el filamento logró ser impreso, pero generando una inspección visual, según la figura 21, la impresión presenta una superficie rugosa, esto se le atribuye al origen reciclable del filamento, pero aun así, el proceso presentó varios problemas más de impresión; constante corte del filamento y obstrucción de la boquilla de la impresora, esto se debe a varios motivos, los principales recaen sobre la humedad y la variación de diámetros a lo largo de la bobina.

Tanto los resultados mecánicos como los visuales de la impresión, se ven directamente influenciados por la variación en el diámetro del filamento. Un diámetro muy pequeño provocará que el engranaje de la impresora no sea capaz de sujetarlo para empujarlo hacía la boquilla y, por el contrario, un diámetro muy grande obstruirá la boquilla. Por lo tanto, la extrusión de filamentos de PLA debe realizarse de manera sistemática. Se requiere consistencia diametral y densidad constante para tasas de alimentación y extrusión de filamentos constantes, y para impresiones de alta calidad.

La principal falla del filamento 100% PLA reciclado se debe a esto, una variación excesiva de su diámetro, que pudo llegar hasta una 2mm de diferencia por sección, es por ello que la calidad de la pieza producida no es buena en comparación con la del otro filamento, las diferencias resaltan a la vista. La pieza presenta tres principales problemas;

-Separación de capas: Esto se puede deber a que la altura de capa pudo ser demasiado alta, esta nunca debe sobrepasar el 80% del diámetro de la boquilla. Ejemplo: si tenemos una boquilla de 0,4 mm, la altura de capa máxima será de 0,32 mm.

-Sobrecalentamiento: Como el material impreso es de origen reciclado, es de esperarse que respondiera de manera diferente a las temperaturas por la cantidad de procesos a la que ya ha sido sometido y junto con esto si la velocidad de impresión fue demasiado rápida las capas no serán capaces de enfriarse antes de que se depositara la capa siguiente encima de ella.

-Atasco de extrusor: Esto ocurre por la constante aparición de segmentos defectuosos en el filamento, la principal causa del cambio de diámetro en el filamento en este caso se le atribuye al origen de la maquinaria utilizada, la extrusora de mesa J35 tuvo varios problemas de funcionamiento atribuibles a su calidad promedio de extrusión y la falta de mantención que tuvo esta.

Las propiedades estructurales de las piezas impresas mediante FDM están influenciadas tanto por las propiedades del material como por los parámetros del proceso utilizados durante la fabricación [43]. La estabilidad dimensional de los objetos de PLA fabricados mediante impresión 3D puede ser deficiente debido a la formación de cambios de tensión y volumen que ocurren durante el proceso de impresión. Este fenómeno se puede atribuir a la variación en la cristalinidad del material PLA [44], que afecta la resistencia a la temperatura, fuerza y tenacidad del polímero.

Numerosos investigadores han realizado estudios sobre el impacto de los parámetros de proceso en el comportamiento de las piezas de PLA impresas en 3D y han demostrado que es posible mejorar la resistencia de estas muestras sin comprometer sus propiedades mecánicas [45]. Los parámetros de impresión, incluido el espesor de la capa, el patrón de relleno, el ángulo de relleno, el porcentaje de relleno, el número de contornos, la orientación de la construcción, la velocidad de alimentación y la temperatura del lecho, se consideran importantes para las muestras de PLA impresas en 3D [46].

Los archivos STL se crean convirtiendo los modelos CAD en mallas, lo que da como resultado un aumento en el número de triángulos de malla, lo que puede mejorar la calidad. Un estudio encontró que la resistencia a la tracción máxima podría variar dependiendo de la impresora utilizada [47]. Debido a que el PLA es sensible a altas temperaturas, la selección de una impresora 3D adecuada puede dar como resultado propiedades optimizadas.

Actualmente, las empresas están considerando la materia prima derivada de desechos como una fuente potencial para la fabricación de filamentos de impresión 3D para reducir el desperdicio de material. Además, este proceso no solo reduce el desperdicio, sino que también preserva los materiales [48]. Por lo tanto, esta podría ser una opción financieramente viable que puede conducir a una disminución en el costo de los materiales de impresión 3D, lo que en última instancia resulta en una reducción en los precios de las impresoras 3D.

CAPITULO 6: Conclusiones

Las bolsas UNIBAG entregaron buenos resultados de procesabilidad durante el proceso de extrusión. Se comportaron de la manera esperada, sin generar taponamiento en la extrusora, de igual manera, el MR de ellas no fue el óptimo, la materia prima fue recibida sin tratamiento alguno lo que ocasionó demoras en extrusión e inyección, esto también fue comprobado en el estudio de sus propiedades mecánicas.

En base a este estudio de propiedades, se utilizaron solo dos mezclas para la fabricación de filamento, siendo estas las con mejores resultados. Los filamentos 100% PLA reciclado presentan variaciones dimensionales significativas que afectan negativamente la calidad de impresión. En cambio, los filamentos compuestos por 70% PLA reciclado y 30% PLA virgen ofrecen un mejor rendimiento en términos de uniformidad y funcionalidad, destacando su potencial para aplicaciones prácticas. Esto se refleja en las piezas impresas con ellos, el filamento combinado mostró mejores resultados en acabado superficial, circularidad y estabilidad dimensional en comparación con las impresas con filamento 100% reciclado. Esto subraya la importancia de las mezclas para superar las limitaciones del material reciclado.

Aunque el reciclaje de PLA es viable, enfrenta desafíos relacionados con la degradación térmica y la variabilidad en las propiedades del material. La incorporación de PLA virgen y el control de los procesos de extrusión e impresión son esenciales para garantizar un producto final de calidad. Este estudio confirma que el reciclaje de PLA para aplicaciones de impresión 3D es una alternativa viable para fomentar la economía circular y reducir el impacto ambiental. Sin embargo, se requiere investigación adicional para optimizar las mezclas y explorar aditivos que mejoren las propiedades del PLA reciclado sin comprometer su biodegradabilidad.

Con base en los resultados obtenidos, el uso de glicerina queda descartado como modificador de propiedades, pero aún quedan opciones por estudiar. Según investigaciones realizadas, existe la posibilidad de utilizar una combinación de compatibilizadores adecuados y extensores de cadena epoxi. Los compatibilizadores reducen eficazmente la energía superficial interfacial de las fases poliméricas en la masa fundida, facilitan la mezcla y la estabilidad de la homogeneidad de la masa fundida y también permiten que se utilicen viscosidades más versátiles de los componentes de la mezcla, lo que hace posible la mejora de propiedades mecánicas.

A modo de recomendaciones para futuras investigaciones, poder generar un reciclaje mecánico controlado es de suma importancia porque este proceso tiene un impacto significativo en la calidad de la mezcla; una vez clasificado el plástico se debe someter a un proceso de lavado, este proceso implica el uso de agua, surfactantes (detergentes) y una solución de hidróxido de sodio (NaOH) para eliminar contaminantes como polvo, grasa, pegatinas, aceite y otros contaminantes [45]. Después de la clasificación y la separación, el plástico se sometió a un proceso de lavado. Según los requisitos de posprocesamiento y el nivel de impurezas, el lavado se puede realizar antes o después de triturar los plásticos y transformarlos en pellets [45]. Lee et al. [42] sugirieron determinar cuidadosamente el tamaño de la pieza triturada, y el tamaño apropiado debe estar dentro del rango de 5 mm. Si las

partículas de plástico trituradas son demasiado grandes, pueden provocar la inclusión de partículas de plástico sin fundir en el filamento extruido. Esto, a su vez, reduce la resistencia mecánica del filamento reciclado.

Referencias

[1] Plastics Europe y EPRO "Plásticos- Situación en 2020: Un Análisis de los Datos sobre Producción, Demanda y Residuos de Plásticos en Europa,", 2020.

[2] D, Padilla-Vasquez, “From Plastic Pollution: 5 Things to Now,” United Nations Foundation, 2024.

[3] M, Gálvez, “Descubre: El Impacto del Plástico en Nuestro Planeta” Futuro Verde, 2021.

[4] S. J. Royer, “Production of methane and Ethylene from Plastic in the Environment”, Plos One, 2018 .

[5] Gobierno de Chile, "Ley 21.100: Prohíbe la entrega de bolsas plásticas de comercio en todo el territorio nacional" , 2018.

[6] Gobierno de Chile, "Ley 20.920: Establece marco para la gestion de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje" , 2016.

[7] R.C. Muñoz, H. S. Villada, J.L. Hoyos, J.F. Solanilla "Aerobic biodegradation of poly(lactic acid) (PLA) in thermoplastic starch (TPS) blends in soil induced by gelatin" International Biodeterioration & Biodegradation, 2024.

[8] Z. Simon, F. Stojcevski, B. Dharmasiri, L.C.Henderson, N. Amini “Circular economy-driven additive manufacturing: A model for recycling PLA/copper composites through multi-extrusion processing”, 2024.

[9] P. Davies, M, Le Gall, Z.Niu, A.I Catarino, Y. De Witte, G.Everaert, H.Dhakal, C.H. Park, E.Demeyer, “Recycling and ecotoxicity of flax/PLA composites: Influence of seawater aging”, 2023.

[10] D. Juninville, C. Tzoganakis, T.H. Mekonnen, “Recycled PLA – Wood flour based biocomposites: Effect of wood flour surface modification, PLA recycling, and maleation”, 2022.

[11] M. Hussain, S. Maqsood, M. Shafiq, N. Abbas, “A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications”, 2024.

[12] M. Vert, “After soft tissues, bone, drug delivery and packaging, PLA aims at blood”, 2015.

[13] D. Gere, T. Czigany, “Future trends of plastic bottle recycling: Compatibilization of PET and PLA”, 2020.

[14] C. Díaz, “Fabricación y caracterización de PLA reciclado”, 2019

[15] Lanzotti, A., Martorelli, M., Maietta, S., Gerbino S., Penta, F., Gloria, A., (2019). A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. Procedia CIRP, Volumen 79, Páginas 143 - 146. Recuperado 20 de enero de 2023

[16] M. Herryman, G. Blanco, “Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias”

[17] J. Shen, “Comparative Life cycle Assessment og Polylactic acid (PLA) and Polyethylene terephthalate (PET)”, 2011.

[18] J. Wypych, “PLA poli (ácido láctico)”, 2016.

[19] S. Anand Kumar, Y. Shivraj Narayan, “Tensile Testing and Evaluation of 3D-Printed PLA Specimens as Per ASTM D638 Type IV Standard, Lecture Notes in Mechanical Engineering”, 2019.

[20] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, M. Martorelli, “The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer”, 2015.

[21] A. Pinho, A. Amor, A. Piedade, “3D printing goes greener: study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components”, 2020.

[22] A. Sousa, A. Pinho, A. Piedade, “Mechanical properties of 3D printed mouthguards: influence of layer height and device thickness”, 2021.

[23] C. Baechler, M. Devuono, J. Pearce, “Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock”, 2013.

[24] S. Huysveld, K. Ragaert, R. Demets, T. Nhu, D. Civancik-Uslu, M. Kusenberg, K. Van Geem, S. De Meester, J. Dewulf, “Technical and market substitutability of recycled materials: calculating the environmental benefits of mechanical and chemical recycling of plastic packaging waste”, 2022.

[25] C. Contreras, “Caracterización de plástico reciclado post producción para ser utilizado en procesos de Economía circular”, 2024.

[26] M. Beltrán, A. Marcilla, “Tecnología de Polímeros”, 2012.

[27] https://www.baopintech.com/products_detail/1010192653010497536.html

[28] https://www.techkits.com/products/model-150a/

[29] “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”, 2014.

[30] A. Marcos-Fernández, J. Rodríguez, “Impresión 3D con materiales elástomeros”, 2019.

[31] https://www.filabot.com/products/ex2-bundle

[32] https://www.todotoner.cl/impresoras/impresoras-3d/impresoras/ender-3-2024-v3-se

[33] Creality Store, “Configuración de parámetros de impression de la serie Creality K1”, 2023.

[34] Zwick/Roell, “Ensayos de tracción”.

[35] Impresoras 3D, “3DBenchy, la mejor forma de saber si tu impresora 3D está bien calibrada”, 2024.

[36] 3dBenchy, “The jolly 3D printing torture-test”.

[37] I. Anderson, “Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid”, 2017.

[38] A. Alexandre, F.A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, M. Camargo, J.M. Pearce, “Mechanical properties of direct waste printing of polylactic acid with universal pellets extruder:

comparison to fused filament fabrication on open-source desktop three-dimensional printers", 2020.

[39] D. Lee, Y. Lee, K. Lee, Y. Ko, N. Kim, "Development and evaluation of a distributed recycling system for making filaments reused in three-dimensional printers", 2019.

[40] J. Pernica, M. Vodák, R. Šarocký, M. Šustr, P. Dostál, M. Černý, D. Dobrocký, "Mechanical properties of recycled polymer materials in additive manufacturing", 2022.

[41] J. Ludwiczak, S. Frąckowiak, R. Łużny, "Effect of recycling on the cellular structure of polylactide in a batch process", 2018.

[42] M. Shiferaw, H. Gebremedhen, "Recycled polymer for FDM 3D printing filament material: circular economy for sustainability of additive manufacturing", 2022.

[43] H.I. Medellin-Castillo, J. Zaragoza-Siqueiros, "Design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: a review", 2021.

[44] E.H. Tümer, H.Y. Erbil, "Extrusion-based 3D printing applications of PLA composites: a review", 2021.

[45] A.a. Alafaghani, A. Qattawi, B. Alrawi, A. Guzman, "Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach", 2017.

[46] C. Camposeco-Negrete, J. Varela-Soriano, J.J. Rojas-Carreón, "The effects of printing parameters on quality, strength, mass, and processing time of polylactic acid specimens produced by additive manufacturing", 2021.

[47] M. Vettori, L. Bergonzi, "A territorial round-robin experiment for the evaluation of mechanical properties of FDM PLA produced by distributed facilities", 2021.

[48] T.M. Joseph, A. Kallingal, A.M. Suresh, D.K. Mahapatra, M.S. Hasanin, J. Haponiuk, S. Thomas, "3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities", 2023.

Anexo A: Tarifas de Suministro Eléctrico a Precio de estabilización 2022-1 de Marzo de 2024.

				TARIFAS BT2 - BT3										
				Administración del servicio		Transporte de electricidad							Electricidad consumida		
Empresa	Comuna	Sector Tarifario	Aéreo o Subterráneo	Cargo fijo mensual BT2 ($/cliente)	Cargo fijo mensual BT3 ($/cliente)	Cargo por uso del sistema de transmisión ($/kWh)	Cargo por servicio público ($/kWh)						Cargo por energía ($/kWh)	Cargo por potencia presente en punta ($/kW/mes)	Cargo por potencia parcialmente presente en punta ($/kW/mes)
							1	2	3	4	5				
CGE DISTRIBUCIÓN	Concepción	STxE-2-A	Aéreo	1.046,93	1.594,16	23,351	0,750	1,602	2,667	3,412	3,732		110,224	14.907,8	10.583,6
CGE DISTRIBUCIÓN	Concepción	STxE-2-S1	Subt.1	1.046,93	1.594,16	23,351	0,750	1,602	2,667	3,412	3,732		110,224	16.729,4	11.782,1
CGE DISTRIBUCIÓN	Concepción	STxE-2-S2	Subt.2	1.046,93	1.594,16	23,351	0,750	1,602	2,667	3,412	3,732		110,224	16.437,5	11.589,9
CGE DISTRIBUCIÓN	Concepción	STxE-2-S3	Subt.3	1.046,93	1.594,16	23,351	0,750	1,602	2,667	3,412	3,732		110,224	18.259,1	12.788,3

Figura 28. Tarifas CGE.

Anexo B: Planos de Fabricación probetas según ASTM D638

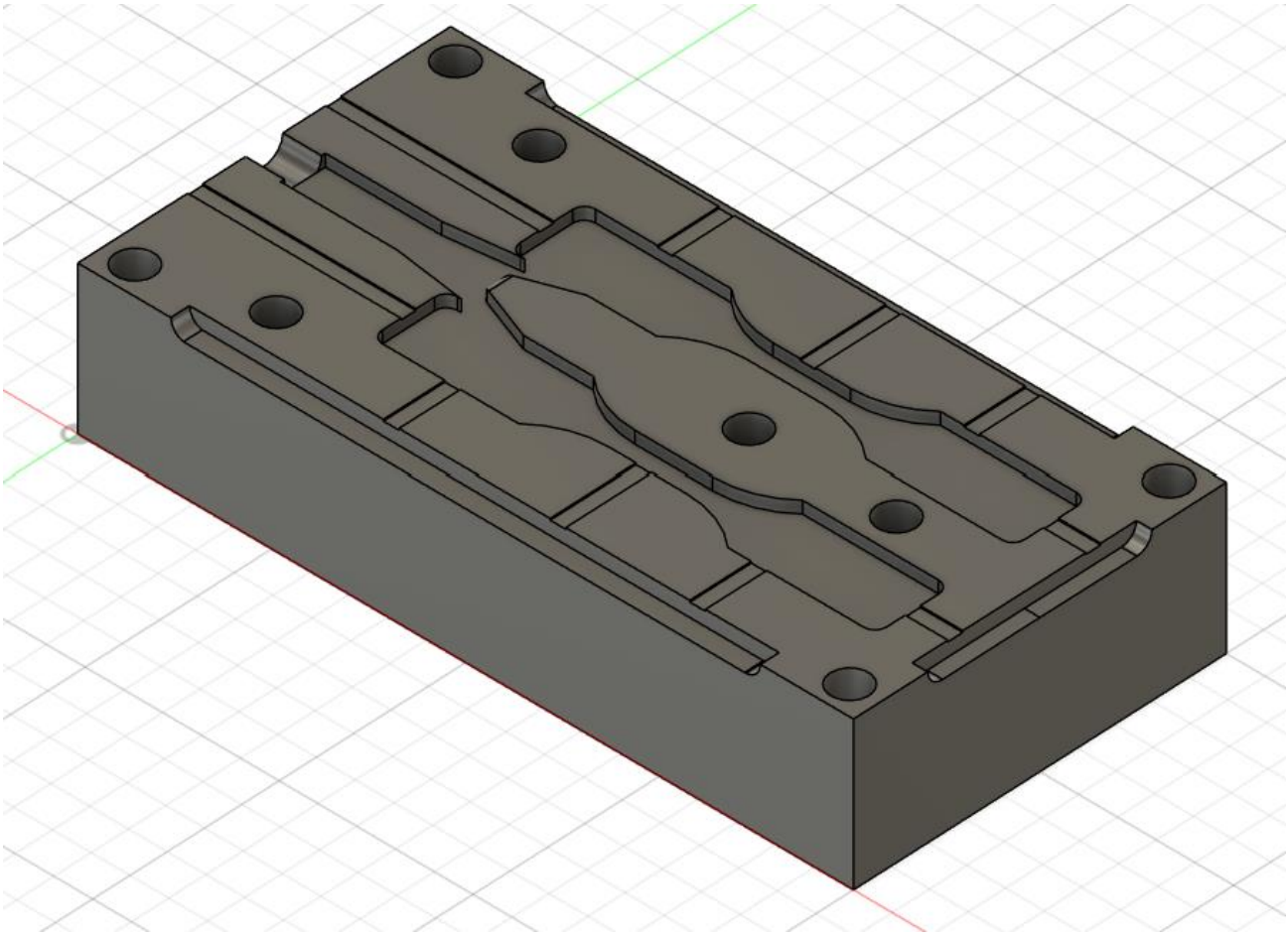
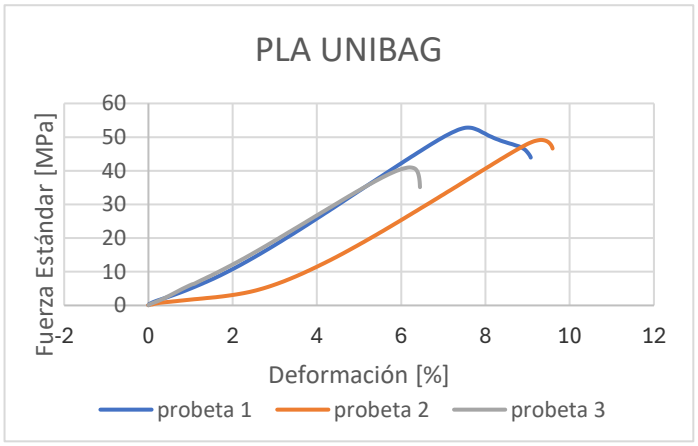


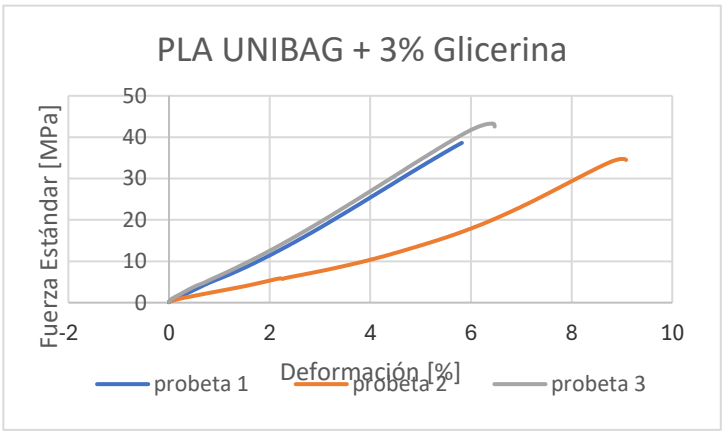
Figura 29. Diseño molde para probetas tipo V. Fuente: Propia.

Anexo C: Gráficos Esfuerzo – Deformación por muestra ensayada.

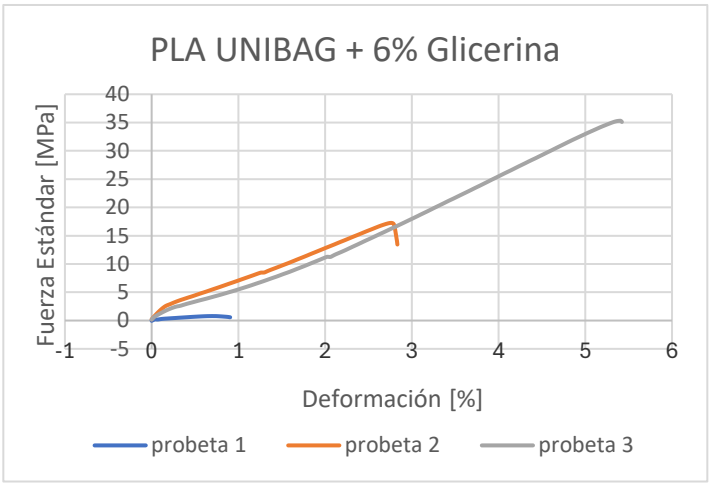
Como se mencionó, se realizaron 21 probetas, en las Figuras se muestran las curvas Fuerza Deformación entregadas por el software de ensayo de cada mezcla ensayada, los datos en ellas mostrados se encuentran sin ningun tipo de modificación.



a)

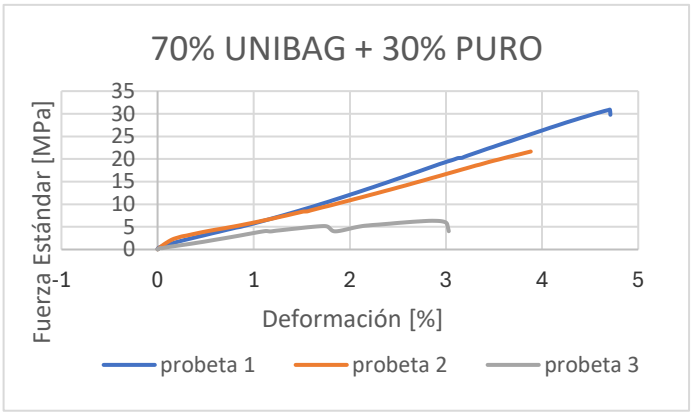


b)

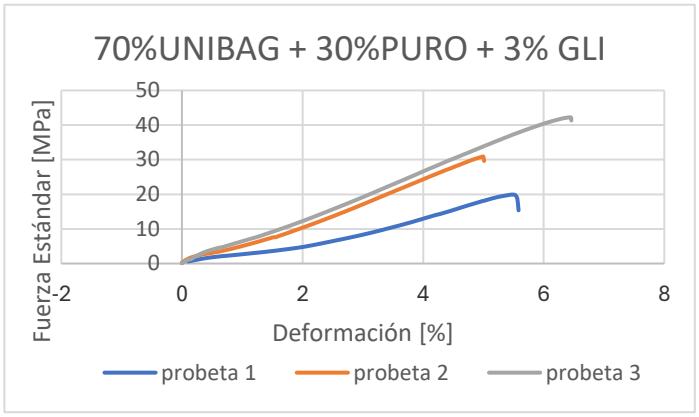


c)

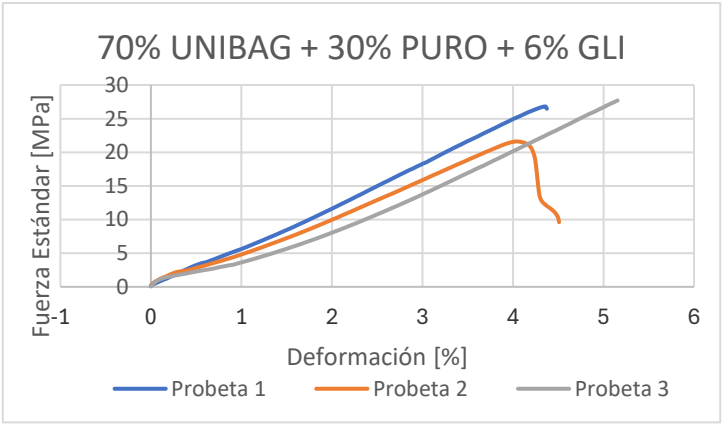
Figura 30. Gráficos obtenidos del ensayo de tracción de mezcla de PLA reciclado. a) PLA 100% reciclado. b) PLA reciclado con 3% GLI. C) PLA reciclado con 6% GLI. Fuente: Propia.



a)



b)



c)

Figura 31. Gráficos obtenidos del ensayo de tracción de mezcla de PLA reciclado. a) PLA reciclado y PLA virgen. b) PLA reciclado y PLA virgen con 3% GLI. C) PLA reciclado y PLA virgen con 6% GLI. Fuente: Propia.

Anexo D: Planos de diseño boquilla de extrusion

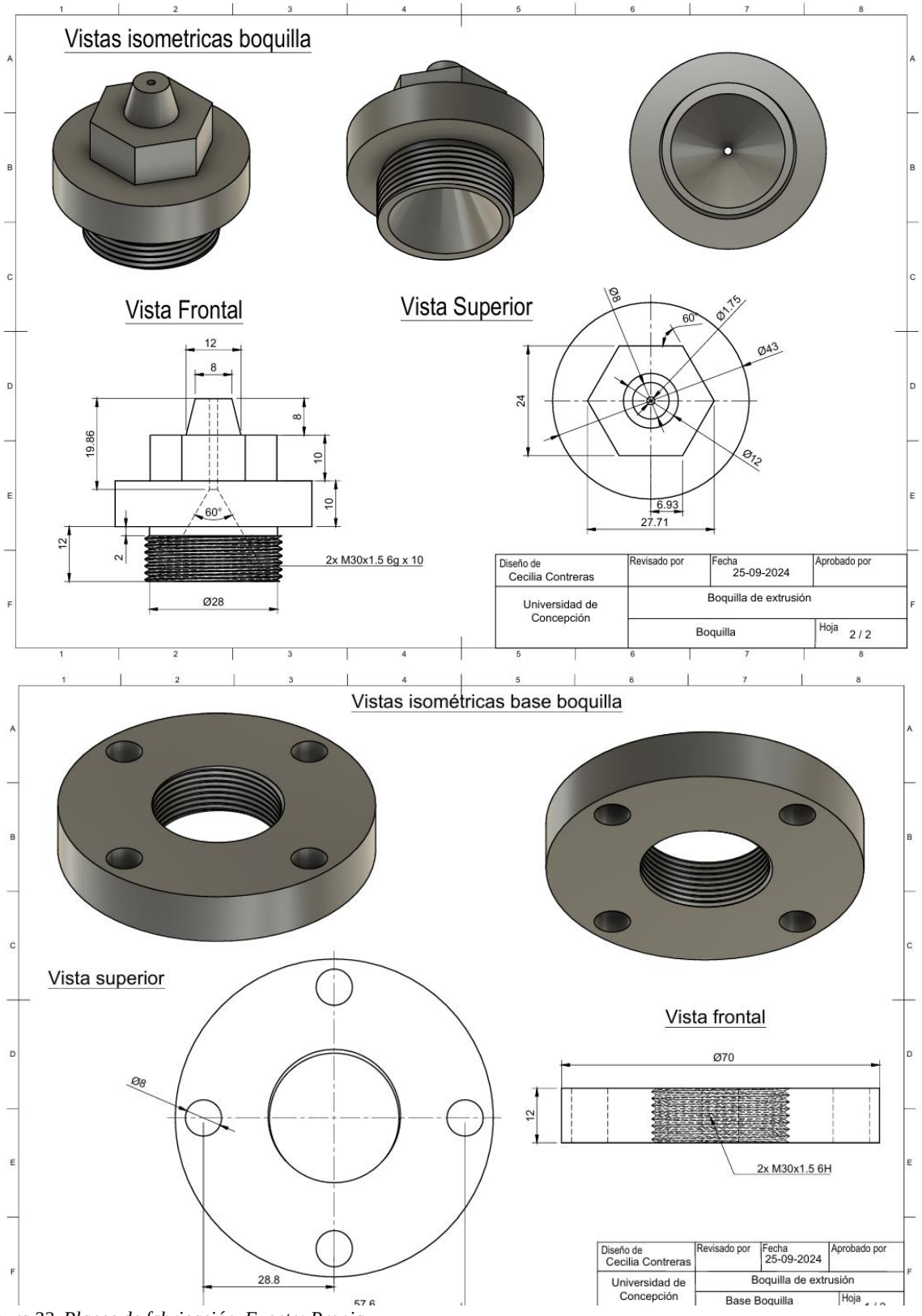


Figura 32. Planos de fabricación. Fuente: Propia.