



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Estudio de factibilidad de fabricación de filamentos para impresoras a 3d.**

Cedillo Enríquez, Kevin Anderson

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Sánchez Sánchez, Xavier Rolando, PhD.

24 de Febrero del 2024

## Resultado de la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos



### Plagiarism and AI Content Detection Report

#### Cedillo\_Copilinks .pdf

#### Scan details

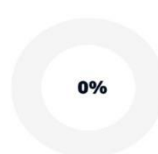
Scan time: February 29th, 2024 at 10:3 UTC      Total Pages: 42      Total Words: 10253

#### Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.3%	32
Minor Changes	0%	0
Paraphrased	1.2%	123
Omitted Words	0%	0

#### AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	0%	0
Human text	100%	10253

[Learn more](#)

#### Plagiarism Results: (4)

##### 3560902038562UTFSM.pdf?seque

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/40932/3560902038562utfsm.pdf?seque>

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA Peumo Repositorio Digital USM <https://repositorio.usm.cl>  
Tesis USM TESIS de Pregrado de acces...



1.1%

##### Esfuerzo de dientes, diseño mecanico (engranajes) - Sección 9-8■Esfuerzo...

<https://www-studocu-com.translate.goog/pt-br/document/univel-centro-universitario/mecanica/esfuerzo-de-...>

Ir para o documento ...

0.4%

##### &quot; Diseño y cálculos de engranes rectos, teórico, así como asistido p...

<https://pdfcoffee-com.translate.goog/quot-diseo-y-calculos-de-engranes-rectos-teorico-asi-como-asistido-por-...>

Guest

Email: [email protected] Login Register ...

0.4%

##### (PDF) Trabajo Diseño de Caja Reductora - DOKUMEN.TIPS

[https://dokumen-tips.translate.goog/documents/trabajo-diseno-de-caja-reductora.html?\\_x\\_tr\\_sl=es&\\_x\\_tr\\_tl=...](https://dokumen-tips.translate.goog/documents/trabajo-diseno-de-caja-reductora.html?_x_tr_sl=es&_x_tr_tl=...)

Unknow

× Log...

0.2%



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

## Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular, “**Estudio de factibilidad de fabricación de filamentos para impresoras a 3d**”, fue realizado por el señor **Cedillo Enríquez Kevin Anderson**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de Febrero de 2024

Firma



Firmado electrónicamente por:  
XAVIER ROLANDO  
SANCHEZ SANCHEZ

-----  
Sánchez Sánchez, Xavier Rolando, PhD.

CC: 1712575826



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Cedillo Enríquez Kevin Anderson**, con cédula de ciudadanía n° 1726720657 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Estudio de factibilidad de fabricación de filamentos para impresoras a 3d”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas

Sangolquí, 15 de marzo del 2024

Firma:



---

**Cedillo Enríquez, Kevin Anderson**  
1726720657



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

### Autorización de publicación

Yo, **Cedillo Enríquez Kevin Anderson**, con cédula de ciudadanía n° 1726720657, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Estudio de factibilidad de fabricación de filamentos para impresoras a 3d**", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 15 de marzo del 2024

Firma:

---

**Cedillo Enríquez, Kevin Anderson**  
1726720657

## **Dedicatoria**

El presente trabajo está dedicado para toda mi familia que con su esfuerzo hicieron posible que pueda culminar la carrera, principalmente a mi madre Maritza que con su apoyo y ejemplo han formado la persona que soy hoy.

A todos mis amigos y compañeros de estudio con los cuales compartimos mucho tiempo, malas noches, alegrías y tristezas durante el tiempo que pasamos en la universidad.

## **Agradecimiento**

En agradecimiento a todas las personas que de alguna forma me dieron una ayuda para llegar a este momento, en especial a mi madre Maritza y mi abuela Isabel, demás integrantes de mi familia, tíos primos, y amigos cercanos de la universidad león, Heredia, Sigcha, y por último, pero no menos importante a mí por no rendirme.

**Índice de contenido**

Resultado de la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos	2
responsabilidad de autoría .....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Resumen.....	15
Abstract.....	16
Aspectos generales .....	17
Planteamiento del problema .....	17
Justificación e importancia .....	18
Objetivos .....	19
Objetivo General .....	19
Objetivos específicos .....	19
Alcance .....	19
Estado del Arte .....	20
Definición de polímero .....	20
Termoplásticos.....	21
Clasificación de envases plásticos.....	22
Procedimiento de reciclaje .....	24
Método de reciclaje.....	26



Reciclaje mecánico.....	26
Impresión 3D.....	27
Propiedades de los filamentos comerciales de impresión 3D.....	30
Extrusión de plásticos.....	32
Materiales, Equipos y Metodología.....	34
Materiales:.....	34
Envases reciclados.....	34
Equipos utilizados.....	35
Trituradora.....	35
Extrusora.....	36
Metodología.....	37
Recolección mediante el reciclaje de plásticos.....	39
Clasificación.....	39
Trituración.....	40
Puesta a punto de la extrusora.....	41
Determinación de cantidades de mezclas de plásticos y temperaturas de extrusión iniciales.....	45
Obtención de muestras de filamento extruido.....	47
Diseño y fabricación de un sistema de enrollado del filamento.....	49
Implementación del diseño de experimentos (DOE), para obtener un filamento adecuado a partir de los ensayos anteriores.....	64
Impresión de modelos con el filamento obtenido.....	68
Caracterización del nuevo material.....	72
Ensayo de tracción.....	72
Ensayo FTIR.....	85

	10
Densidad.....	90
Análisis de Resultados.....	92
Determinación de parámetros adecuados para obtener el filamento .....	92
Optimización de parámetros usando Minitab .....	96
Conclusiones y Recomendaciones .....	97
Bibliografía.....	99
Apéndices .....	101

## Índice de tablas

Tabla 1	Materiales utilizados para obtener el filamento.....	46
Tabla 2	Obtención de muestras de filamento .....	47
Tabla 3	Pasos diametrales adecuados para engranajes con ángulo de presión de 20° .....	53
Tabla 4	Módulos métricos estandarizados.....	53
Tabla 5	Combinación de dientes para eliminar interferencia .....	54
Tabla 6	Resumen de engranajes seleccionados y las rpm a las que trabajan .....	55
Tabla 7	Calidad de los engranajes según la AGMA .....	55
Tabla 8	Factores de sobrecarga .....	57
Tabla 9	Factor de tamaño .....	57
Tabla 10	Factor de confiabilidad.....	58
Tabla 11	Parámetros de los engranajes .....	62
Tabla 12	Factores de diseño de engranajes.....	63
Tabla 13	Combinación de condiciones para la realización del DOE .....	66
Tabla 14	<i>Información del factor.....</i>	67
Tabla 15	Resumen del modelo .....	67
Tabla 16	Coeficientes .....	67
Tabla 17	Parámetros de impresión de filamento comercial.....	69
Tabla 18	Parámetros de impresión de las probetas .....	73
Tabla 19	Parámetros de ensayo de tensión .....	76
Tabla 20	Valores obtenidos en el ensayo de tensión de las probetas.....	77
Tabla 21	Muestras de filamento ensayado .....	81
Tabla 22	Resumen de propiedades mecánicas del filamento y promedios de muestras .....	85
Tabla 23	Densidad de las probetas .....	92
Tabla 24	Escala de calidad del filamento extruido.....	93
Tabla 25	Combinación de parámetros para tomas de datos .....	94

Tabla 26	Análisis de varianza del DOE.....	94
Tabla 27	Parámetros a optimizar con el DOE especificando un objetivo y rango de este.....	96
Tabla 28	Solución de la optimización realizada .....	96

## Índice de figuras

Figura 1. Rollo de filamento 3D importado.....	17
Figura 2 Código de identificación de plásticos.....	22
Figura 3 Patrones y porcentajes de relleno .....	29
Figura 4 Partes de una extrusora de tornillo simple.....	33
Figura 5 Zonas de la extrusora y aumento de presión.....	34
Figura 6 Máquina trituradora de plástico.....	35
Figura 7 Extrusora de plástico .....	36
Figura 8 Reciclaje de tapas de botellas .....	39
Figura 9 Envases PET reciclados .....	40
Figura 10 Restos de tapas triturados .....	41
Figura 11 Revisión del tablero de control.....	42
Figura 12 Desmontaje y revisión de componentes de la extrusora .....	43
Figura 13 Ensamble de partes de la extrusora y prueba de funcionamiento.....	44
Figura 14 Boquilla para extruir el filamento.....	45
Figura 15 Proceso de trefilado.....	49
Figura 16 Motor eleva lunas.....	52
Figura 17 Gráfica para obtener el factor de geometría .....	56
Figura 18 Gráfica para obtener factor $C_{pf}$ de distribución de carga .....	59
Figura 19 Gráfica para obtener factor $C_{ma}$ de distribución de carga .....	59
Figura 20 Gráfica para obtener factor de espesor de orilla.....	60
Figura 21 Gráfica para obtener factor dinámico.....	61
Figura 22 Diseño CAD del sistema de enrollado .....	64
Figura 23 Impresión 3D y ensamblaje de componentes del sistema de enrollado .....	64
Figura 24 Diagrama de relevancia de los parámetros .....	68
Figura 25 Modelo CAD para impresión.....	69
Figura 26 Configuración de parámetros de impresión .....	70
Figura 27 Laminado de modelo STL previamente diseñado .....	71

Figura 28 Modelo impreso con el filamento de material reciclado .....	71
Figura 29 Falla prematura de probetas impresas en 3D con la forma convencional...	72
Figura 30 Modelado de probeta utilizando FullControl GCode Designer.....	73
Figura 31 Orientación de las fibras paralelas o transversales para la impresión de las probetas .....	74
Figura 32 Sentido de impresión de las probetas.....	75
Figura 33 Impresión 3D de las probetas para ensayos de tensión.....	75
Figura 34 Máquina de ensayos universales INSTRON 8801 .....	76
Figura 35 Falla de probeta con fibras en sentido paralelo .....	78
Figura 36 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta N°2.....	79
Figura 37 Falla de probeta con fibras en sentido transversal .....	79
Figura 38 Diagrama fuerza vs desplazamiento, probeta N° 17 .....	80
Figura 39 Máquina de tracción horizontal .....	81
Figura 40 Diagrama esfuerzo deformación del filamento 1 .....	82
Figura 41 Diagrama esfuerzo deformación del filamento 2 .....	83
Figura 42 Diagrama esfuerzo deformación filamento 3 .....	84
Figura 43 Enlaces químicos y longitud de onda .....	86
Figura 44 FTIR estándar del PELD.....	86
Figura 45 Comparación de espectrómetro del material antes y después de procesarlo .....	87
Figura 46 Espectrómetro del material base y el patrón estándar de polietileno .....	88
Figura 47 Espectrómetro del filamento y el estándar de PELD .....	89
Figura 48 Probetas para cálculo de densidad.....	90
Figura 49 Balanza usada para medir masa de probetas, tubo con escala graduada de volumen.....	91

## Resumen

En la actualidad muchos modelos visuales o piezas son elaborados con impresión 3D, la cual permite fabricar un objeto tridimensional mediante la adición de un material superponiéndolo en capas hasta obtener la forma del modelo digital previamente diseñado, el material que se funde y se deposita en capas comúnmente es un filamento de algún polímero comercial como ABS o PLA que son los más comunes en el mercado. (Boude Oscar, 2017)

El proceso descrito anteriormente se conoce como modelado por deposición fundida (FDM), sin embargo, es el tipo de impresión 3D más sencillo que existe y es compatible con algunos termoplásticos, es posible crear piezas únicas que forman parte de un modelo más complejo todo esto sin la necesidad de fabricar un molde especial para cada parte, lo cual reduce tiempos y costos de producción de nuevos productos. (Roberto Adeva, 2023)

Debido a que los filamentos comerciales utilizados en las impresoras son importados estos tienen un costo considerable en el mercado, de este modo producir un filamento a partir de material reciclado nos permitiría tener un mayor stock de material y aun costo más bajo para la fabricación de modelos visuales o prototipos.

Para el presente proyecto se busca realizar un estudio de la factibilidad de producir un filamento capaz de ser utilizado en impresoras 3D convencionales, que será elaborado a partir de procesar envases plásticos reciclados, triturándolos y fundiéndolos en una extrusora, realizando ensayos con diferentes cantidades de mezclas y temperaturas hasta obtener un filamento adecuado para una impresora 3D por FDM convencional.

*Palabras clave:* prototipo, filamento, termoplástico, polímero.

### **Abstract**

Currently, many visual models or pieces are made with 3D printing, which allows a three-dimensional object to be manufactured by adding a material, superimposing it in layers until obtaining the shape of the previously designed digital model, the material being melted and deposited in layers. It is commonly a filament made of a commercial polymer such as ABS or PLA, which are the most common on the market. (Boude Oscar, 2017)

The process described above is known as fused deposition modeling (FDM), however, it is the simplest type of 3D printing that exists and is compatible with some thermoplastics, it is possible to create unique parts that are part of a more complex model. without the need to manufacture a special mold for each part, which reduces production times and costs of new products. (Roberto Adeva, 2023)

Because the commercial filaments used in printers are imported, they have a considerable cost in the market, thus producing a filament from recycled material would allow us to have a larger stock of material and even a lower cost for manufacturing models. visuals or prototypes.

For this project, we seek to carry out a study of the feasibility of producing a filament capable of being used in conventional 3D printers, which will be made from processing recycled plastic containers, crushing and melting them in an extruder, carrying out tests with different quantities of mixtures. and temperatures until obtaining a filament suitable for a conventional FDM 3D printer.

*Key words:* Prototype, filament, thermoplastic, polymer.



## Aspectos generales

### Planteamiento del problema

Para producir una pieza 3D de un elemento previamente diseñado en un software de modelado se requiere suministrar materia prima a la impresora, la cual es el filamento de un termoplástico, en el Ecuador la producción de filamentos para impresión 3D está en fase de investigación y ensayos aun, llevadas a cabo por Bacteria Lab y Tachapir (Prendho UTPL, 2018), no se produce una cantidad suficiente para comercializarla y que cubra la demanda, por lo cual siempre se recurre a obtener materia prima importada de países que poseen un mayor desarrollo tecnológico (Figura 1), pero el precio de esta es considerable debido al valor que suman los impuestos y el costo de traerla al país.

#### Figura 1.

*Rollo de filamento 3D importado*



*Nota.* Rollo de filamento comercial de 1 Kg. Obtenido de: Global solución technologies

El reciclaje de residuos plásticos actualmente es una necesidad debido a la cantidad que se produce, siendo esta de 400 millones de toneladas al año y que solo el 9% de estos han podido ser reciclados (Han et al., 2023), por esta razón los que no son reutilizados terminan en vertederos, ríos o incinerados por los usuarios.

Se busca fomentar el reciclaje de estos mediante la clasificación y procesamientos para generar productos a partir de materia prima reciclada reduciendo así la cantidad de desecho que termina en los rellenos sanitarios municipales.

### **Justificación e importancia**

El proyecto surge debido a que en el área de la manufactura aditiva las impresoras 3D por FDM hoy en día están siendo muy empleadas para la elaboración de modelos visuales, prototipos o componentes de algún mecanismo que se desee reparar, por lo tanto, para que estos sean fabricados se requiere de un suministro de materia prima el cual es el filamento termoplástico que por lo general es importado de países más desarrollados dado que no se produce localmente.

El contar con un suministro continuo de filamento permite que la fabricación de los modelos impresos no sufra de tiempos muertos mientras se consigue el material, ciertamente la mayoría de usuarios de impresión 3D desconocen que es posible obtener filamento para sus máquinas elaborado en el país a partir de material reciclado y que muy probablemente este sea más económico.

Entre los resultados que serán obtenidos en la realización de este trabajo serán la de obtener un filamento capaz de ser usado en impresoras 3D para la fabricación de modelos, el cual al ser obtenido del reciclaje de plásticos se está ayudando a la reducir la contaminación ambiental mediante la reutilización de estos, además de que con la caracterización del nuevo material del que estará compuesto el filamento se podrán conocer algunas de sus propiedades físicas y mecánicas haciendo posible que estas sean consideradas en el diseño de un elemento.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Investigar y producir un filamento para impresoras 3D a partir de plásticos reciclados, que sea capaz de fabricar modelos y ser usado en impresoras 3D convencionales.

### **Objetivos específicos**

- Investigación de la composición de los filamentos termoplásticos para impresoras 3D.
- Estudio de viabilidad de producción de filamentos a base del reciclaje.
- Elaboración de la mezcla para los filamentos de impresión a 3D.
- Toma de datos y análisis de resultados.

### **Alcance**

Este proyecto de titulación propuesto en el área de ciencia de los materiales engloba el estudio de obtención de materiales reciclados obtenidos de la recolección de envases termoplásticos (PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS), los cuales al ser clasificados y procesados en una extrusora harán posible la obtención de muestras de filamentos, de estos se evaluará cuales combinaciones de mezclas y temperaturas ensayadas son apropiadas para usar en una impresora

El filamento obtenido de la extrusora deberá tener un diámetro igual a los filamentos comerciales que manejan las impresoras 3D siendo de 1.75mm, al salir de la extrusora este debe ser almacenado para su uso a futuro, por lo cual se requiere diseñar y construir un sistema de enrollado el cual recolecte el filamento envolviéndolo en un carrete

Al determinar con que parámetros de cantidades de mezcla y temperatura se obtiene un filamento adecuado para ser usado en impresoras 3D en la fabricación de modelos, se buscara obtener propiedades del nuevo material para caracterizarlo realizando ensayos de:

- Densidad en plásticos
- Ensayo de tensión
- Espectrofotometría infrarroja (FTIR)

Los resultados obtenidos de ensayar las probetas serán tabulados y presentados como las propiedades del nuevo material.

## **Estado del Arte**

### **Definición de polímero**

Un polímero está constituido por múltiples parte o unidades entrelazadas, de ahí que su nombre significa “muchas partes”, todas estas están unidas unas con otras formando un objeto sólido (Smith W. & Hashemi J, 2006), sus enormes moléculas que también se denominan macromoléculas formadas por muchos monómeros y presentadas en forma de cadena unidas por enlaces químicos, tienen pesos aproximados entre 10 000 y 1000 000 gramos por mol.

Existen polímeros en estado sólido y líquido, gran cantidad de estos son orgánicos debido a la presencia de carbono en su estructura, en los inorgánicos encontramos que en sus cadenas existen átomos de silicio, estaño, germanio fósforo o azufre.(Askeland, 2004)

Entre los grupos de polímeros usados comúnmente en la producción industrial tenemos a los plásticos y los elastómeros, los plásticos consisten en un extenso conjunto de materiales de origen sintético, los cuales tienen gran facilidad para procesarlos ya sea

deformándolos o moldeándolos en comparación con los metales (Smith W. & Hashemi J, 2006), estos se dividen en dos clases, los termoplásticos y los termofijos de acuerdo a su comportamiento al aplicarles calor de si pueden volver a fundirse y moldearse nuevamente o no.

Los elastómeros que son mas conocidos como caucho o hules pueden deformarse elásticamente mayor al 200%, su cadena polimérica posee una forma de espiral la cual se puede deformar cuando se la somete a una fuerza externa y cuando esta deja de aplicarse recupera su forma.

Los polímeros tienen aplicaciones en ingeniería muy importantes por la variedad de propiedades que tienen y por el bajo costo de la mayoría de estos además que permiten hacer diseños más simples de ensamblar, mejores acabados superficiales y el bajo peso que poseen estos materiales.(Smith W. & Hashemi J, 2006)

### **Termoplásticos**

Un termoplástico es un polímero que está compuesto por largas cadenas de monómeros que pueden ser lineales o ramificadas de átomos de carbono unidos a través de enlaces covalentes, cuando se les aplica calor estos pueden llegar a fundirse o adquirir la forma de un molde, este proceso pueden realizarlo un número de veces sin que se afecte considerablemente sus propiedades, a temperatura ambiente conservan la forma que se les dio en caliente, dado que las temperaturas a las que se los procesa es inferior a los 200°C su fabricación no requiere tiempos de producción mayores al minuto. (Shackelford, 2016)

Si el termoplástico es amorfo tendrá una temperatura tura de transición vítrea  $T_g$ , en la cual sobre esta temperatura el polímero se reblandece y muestra un comportamiento viscoso como si se tratara de un caucho o un cuero flexible disminuyendo sus propiedades mecánicas, pero bajo esta temperatura se vuelve frágil como un vidrio por lo cual la  $T_g$  puede considerarse como la temperatura de transición de dúctil a frágil (Smith W. & Hashemi J, 2006).

En el caso de ser un material cristalino poseerá una temperatura de fusión  $T_m$ , en la cual el polímero pasa de un estado viscoso como goma a un estado líquido, esta propiedad solo la tienen los termoplásticos semicristalinos.

Los termoplásticos si bien son baratos y fáciles de procesarlos para moldearlos y darle una forma específica que se requiere, también poseen desventajas como material como lo es que no soportan altas temperaturas porque se reblandecen y pierden propiedades mecánicas o pueden llegar a fundirse (Beltrán M, 2023).

### Clasificación de envases plásticos

Entre los termoplásticos más comerciales de los cuales se fabrican los envases como botellas, recipientes entre otros están identificados por un número el cual va del 1 al 7 marcado en el envase dentro del triángulo de flechas que es el símbolo de reciclable, con esto es posible diferenciarlos en base a las resinas de las que están elaborados para poder clasificarlos adecuadamente y reciclarlos (Figura 2).

**Figura 2**

*Código de identificación de plásticos*



*Nota.* Número de identificación de tipo de envases plásticos para su clasificación.

Obtenido de: Diario sostenible

Polietileno tereftalato (PET): Este material tiene propiedades de ser transparente y ser resistente a químicos debido a la orientación estructural que posee, además de que

presenta altas propiedades mecánicas en cuanto a su resistencia, tenacidad y un bajo peso, es utilizado principalmente para la fabricación de botellas para bebidas, envases para comestibles, juguetes o hasta incluso se llegan a fabricar chalecos antibalas con este material. (Meré Javier, 2009)

Polietileno de alta densidad (PEAD): Posee una conductividad térmica baja, además de eso su punto de fusión en promedio es de 110°C, debido a que es aislante eléctrico se lo utiliza como aislante en aplicaciones de baja y alta tensión, entre las aplicaciones mas comunes de este material son las de fabricar envases de comida, botellas de leche, aceite o en la fabricación de partes de juguetes o utensilios domésticos como canastas.(Opazo María, 2020)

Polietileno de baja densidad (PEBD): Se lo encuentra más comúnmente elaborado en películas delgadas, su resistencia al ser sometido a tracción, rasgado o al impacto es buena, puede ser utilizado hasta en temperaturas de -95°C, su elongación es excelente por lo cual es empleado para fabricar rollos de película de embalaje film, bolsas plásticas, los envases de este material son flexibles.

Polipropileno (PP): Es un termoplástico el cual posee una buena resistencia mecánica y al calor además de una baja densidad, no permite que la humedad, lípidos o productos químicos pasen a través de él, por lo cual es usado para fabricar recipientes para combustibles, parachoques de automóviles, tapas de botellas o lonas, además que puede ser reutilizado con seguridad. (Meré Javier, 2009; Opazo María, 2020)

Poliestireno (PS): Posee una capacidad de moldearse fácilmente, aunque no resiste altas temperaturas, debido a su bajo costo el uso más común de este termoplástico es para envases desechables de alimentos, como vasos, tarrinas o artículos deportivos, cascos,

salvavidas teniendo así una extensa cantidad de aplicaciones por sus propiedades. (Meré Javier, 2009)

Policloruro de vinilo (PVC): Este material posee una excelente resistencia eléctrica y al fuego, este no es reciclable y no se debe volver a reutilizarlo, su uso es muy versátil ya que puede ser empleado en la fabricación de objetos como ventanas, tuberías, juguetes entre otros, es el segundo más usado a nivel mundial solo detrás del polietileno. (Meré Javier, 2009)

Otros, en este grupo se engloba a los termoplásticos que no entran en los mencionados anteriormente, ya sea porque son productos de mezclas de resinas de estos, normalmente no es posible reciclarlos por lo cual se los desecha y se debería tratar de evitar adquirirlos en lo posible, uno ejemplo es el policarbonato que posee características de alta resistencia y transparencia, teflón que posee resistencia a altas temperatura y anti adherencia o el nylon con una buena resistencia mecánica y a sustancias como aceites o disolventes, es usado como material para fabricación de engranajes o componentes mecánicos. (Meré Javier, 2009; Opazo María, 2020)

### **Procedimiento de reciclaje**

Para poder reciclar los residuos plásticos que se han producido de manera doméstica o generados por empresas, se deben realizar una selección y clasificación de estos en las 7 categorías según el tipo de resina, con el fin de que una entidad con los métodos y maquinaria especializada los procese y fabrique productos similares para el mismo uso u otro diferente, aunque de menor calidad, de este modo se reduce una gran cantidad de residuos producidos, ahorrando recursos naturales y energía para producirlos. (Carabajal et al., 2018)



Durante el proceso de reciclaje las empresas toman en cuenta ciertas características para controlar en medida de lo posible las propiedades de los materiales que se están reciclando, incluyendo las propiedades mecánicas las características a considerar son:

**El color del envase y la transparencia:** Dado que los envases que ya poseen color se les debe agregar colorante negro para uniformizar el color de estos, sino al reciclarlos los tonos de color obtenidos serian grises o pardos los cuales evita comprar el consumidor, el plástico reprocesado con colorante es más económico que el que no posee colorante.(Rubiano J et al., 2011)

**Limpieza:** Las propiedades mecánicas que obtendrán los productos elaborados del plástico reprocesado serán mejores mientras menos contaminantes como grasas, tierra o pegantes hayan estado presentes en los envases recolectados.

**Presentación:** Mientras mas pequeños sean los envases requieren de mayor mano de obra para empaquetarlos en bloques en comparación con los envases mas grandes los cuales es más barato empaquetarlos y asi transportarlos a las plantas donde serán triturados y procesados.

**Clasificación:** Cuando los plásticos han sido separados por su color o características físicas si son rígidos, flexibles o si se trata de botellas o películas hacen que el reprocesado de estos sea más fácil, amentando el valor de esta materia por el procesamiento previo de clasificación(Rubiano J et al., 2011)

## ***Método de reciclaje***

### ***Reciclaje mecánico***

En este proceso el plástico que ha sido recolectado para ser reciclado se transforma en pellets o un producto del cual las entidades que se dedican a elaborar productos plásticos puedan procesar y darle una forma final, los procesos desde que se ha recolectado hasta el producto final son:

**Limpieza:** Los envases o material plástico recolectado es revisado para extraer las bolsas con cintas plásticas, pegantes o tintes de impresión o grasas que puedan alterar considerablemente la calidad y propiedades del plástico reciclado.

**Clasificación:** aquí un operador separa los plásticos manualmente según el tipo o por el color, posteriormente es almacenando y marcando al tipo de plástico que corresponde para ser transformado más adelante.

**Lavado:** El proceso se lo realiza en grandes tanques con agua caliente o fría que además pueden contener detergentes que ayuden a la eliminación de grasas tierra u otras impurezas que sean posibles de eliminar.

**Trituración:** El material ya limpio es cortado por las cuchillas de la trituradora la cual produce pedazos lo suficientemente pequeños para ser procesados y manipulados más fácilmente reduciendo también así el espacio que ocupaba el material inicialmente. (Rubiano J et al., 2011)

**Aglutinado:** Consiste en introducir el material ya picado y hacerlo que las cuchillas de la aglutinadora lo revuelvan para producir rozamiento entre el material, lo cual a su vez producirá calor, posteriormente se introduce agua a temperatura ambiente y está por las altas temperaturas del material pasara a estado gaseoso convirtiéndose en vapor que

ayudara que los pequeños trozos picados tomen forma de granos asimétricos este producto no es adecuado aun para que la industria produzca algo con él, por ende requiere la etapa de producción de pellets que si son comercializados industrialmente.(Rubiano J et al., 2011)

Extrusión o granulación de pellets: En este proceso se busca uniformizar que las partículas de plástico reciclado tengan el mismo tamaño, para lo cual el material obtenido del proceso de aglutinado es introducido en una extrusora, esta transfiere calor al material llegando a fundir el plástico y por medio de la presión que genera el empuje del tornillo sin fin el plástico sale por una boquilla, se lo enfría por agua y se lo corta en pedazos de aproximadamente 3x3 mm a los cuales se conoce como pellets, en este proceso es posible agregar colorantes a la mezcla o químicos para mejorar las propiedades del plástico. (Carabajal et al., 2018)

El ultimo paso es el empaquetado de los pellets y almacenado para su comercialización, si la misma empresa utilizara este producto lo introduce en sus maquinas para fundirlo y obtener ya un producto con forma definida ya sea utilizando procesos de extrusión, soplado para fabricar envases, inyección en moldes, termoformado u otros.(Carabajal et al., 2018; Rubiano J et al., 2011)

### **Impresión 3D**

Anteriormente los procesos de fabricación de objetos consistían en retirar material progresivamente hasta dar la forma final que requería la pieza utilizando fresado, torneado perforado, otro método era el de deformar al material para darle la forma empleando el moldeado, plegado, embutido o combinar diferentes materiales como un tejido casi cualquier objeto podía ser fabricado utilizando estos procesos, pero eso implicaba utilizar gran cantidad de herramientas y materiales y esto aumenta el tiempo y costo de fabricación.(Berchon M & Luyt B, 2014)

A diferencia de los métodos de fabricación mencionados anteriormente la fabricación aditiva o comúnmente llamada impresión 3D es muy diferente ya que se construye el objeto desde cero agregando material capa por capa, la pieza va tomando forma a medida que las capas se van solidificando y superponiendo unas sobre otras

LA impresión 3D requiere previamente de un modelo digital diseñado en un software CAD, el proceso de la impresión 3D convierte al modelo digital en muchas capas y lo empieza a construir capa por capa de abajo hacia arriba hasta que todas se acumulan y forman el objeto diseñado, entre las ventajas de este proceso de manufactura están:

- No requieren de mucha mano de obra con conocimiento de diferentes procesos de manufactura para producción de la pieza.
- Poder producir piezas con geometría complicadas en poco tiempo.
- Se desperdicia menos material en la fabricación.
- No se necesita más máquinas o herramientas especiales aparte de la impresora.
- Producción rápida de prototipos o modelos visuales.

La impresión 3D tiene como objetivos principales, fabricar el primer prototipo de un producto sea en el mínimo tiempo y sin recurrir a procesos de mecanizado convencionales para ser elaborado, se puede fabricar el modelo con partes interconectadas que posean geometrías complejas sin requerir que estas sean ensambladas posteriormente aumentando así la productividad.(Palacios María, 2017)

Las impresoras 3D convencionales realizan el modelado por deposición fundida (FDM) en la cual el filamento termoplástico es fundido y extruido por una boquilla siendo depositado en la base en capas que se superponen una sobre otra para ir construyendo el modelo según los datos del modelo 3D ingresados en la máquina, se puede fabricar prototipos para

realizar pruebas y de ser necesario modificar el diseño, entre los materiales mas usados de filamento tanto de forma casera como industrial son el PLA (Ácido Poliláctico), ABS (Acrilonitrilo butadieno Estireno) y el Nylon que es una poliamida (Palacios María, 2017)

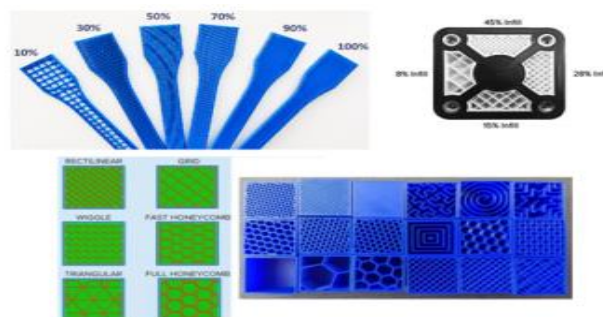
Para fabricar por impresión 3D el procedimiento más común es realizar un modelado 3D del objeto realizado en un software CAD con la geometría y dimensiones deseadas, guardar el modelo en formato STL también se puede en OBJ, PLY o FBX según la impresora a utilizar, si al exportar el modelo como STL se generan agujeros, huecos u otros fallos estos deben ser corregidos.(E3D+VET, 2017)

Cuando el modelo posee partes en voladizo es necesario analizar si requiere de estructuras soporte para la impresión de estas partes, cuando tienen una inclinación mayor a 45° si es necesario, pueden estar construidas del mismo material o de materiales solubles en ciertos líquidos.(Berchon M & Luyt B, 2014)

Durante la impresión las paredes del objeto se construyen de manera solida mientras que lo interno no lo es, este tiene un porcentaje de relleno y un patrón geométrico, estos se eligen en función de la resistencia, peso, tiempo de impresión u otros aspectos, a mayor porcentaje mayor es el tiempo de manufactura y la resistencia que se obtiene pero comúnmente con un 15% es adecuado para prototipos rápidos.(E3D+VET, 2017)

### Figura 3

*Patrones y porcentajes de relleno*



*Nota.* Patrones de relleno usados en objetos de impresión 3D Obtenido de: Guía técnica de impresión 3D E3D+Vet

Elegir la posición u orientación de la pieza permite que se minimicen las partes en voladizo presentes lo cual implica un menor tiempo de impresión y menos material en soportes, un ejemplo es imprimir piezas que poseen agujeros se debe posicionar la pieza de manera que el eje del agujero sea perpendicular a la cama de impresión si no se quiere usar soportes y mejorar la calidad del mismo.

En la impresora se debe examinar que el extrusor y la cama están calientes, de preferencia utilizar lacas que ayuden a desprender la pieza de la base, cada usuario debe leer las instrucciones del manual de cómo usar la maquina y la colocación del filamento, al extraer las piezas se puede utilizar cuchillas de ser necesario para desprenderlas de la base, entre los procesos de acabado final después de terminada la impresión tenemos:

- Remover soportes, si los hay pueden hacerse cortándolos o disolviéndolos si el material lo permite.
- Lijar la superficie si se requiere conseguir un mejor acabado.
- Pintar, es aconsejable antes dar una capa de imprimación para conseguir mejor adherencia de las pinturas a aplicar.

### **Propiedades de los filamentos comerciales de impresión 3D**

Las impresoras 3D necesitan para construir un modelo requieren un termoplástico el cual funden y por medio de la boquilla extrusora realizan la deposición del material fundido dibujando la forma del objeto, este material comúnmente es el filamento de ABS o PLA que son los más comerciales, de entre los más relevantes que se encuentran disponibles en el mercado ya sea par impresión 3D casera o de manera industrial se detallan ciertas propiedades a continuación, los datos técnicos de temperaturas y requerimientos se detallan en el anexo1.

**ABS** (Acrilonitrilo butadieno estireno): Es un material que está constituido por tres monómeros como lo indica en su nombre, el cual posee características de alta resistencia y rigidez, soporta altas temperaturas y productos químicos, en bajas temperaturas no se vuelve frágil a diferencia de otros plásticos además puede ser mecanizado con procesos de corte perforación. (Palacios María, 2017; Villegas Edmundo, 2019)

**PLA** (Ácido Poliláctico): Es un material biodegradable a diferencia de otros polímeros, no requiere temperaturas elevadas en el proceso de impresión por lo que es un material más sencillo de usar, pero esto mismo provoca que no soporte realizarle un corte o perforación debido a que se puede deformar por el calor producido. (Palacios María, 2017)

**PVA** (Acetato de polivinilo): Es un polímero sintético que comúnmente se lo encuentra como cola para madera debido a sus características gomosas y adhesivas, es de los polímeros que puede ser disuelto el agua por lo que puede ser empleado para la elaboración de soportes de apoyo en la impresión de modelos y que estas sean retiradas fácilmente incluso de lugares de difícil acceso, no es adecuado para soporte muy pequeños ya que puede sufrir deformaciones en la pieza modelo.(Villegas Edmundo, 2019)

**HIPS** (Poliestireno de alto impacto): Este material termoplástico posee características similares al ABS , es biodegradable por lo que no afecta al medioambiente al desecharse, es usado en modelos que requieren un excelente control dimensional, además que es fácil de pintarlo, pegarlo, uno de sus usos es para fabricar piezas que contienen espacios huecos en su interior ya que es soluble en un hidrocarburo denominado limonelo.(Villegas Edmundo, 2019)

No es resistente a ser expuesto a luz ultravioleta, al ser usado en impresión 3D y evitar que no se produzcan problemas de adhesión se debe usar una cama calefactada durante el proceso de construcción del modelo. (Palacios María, 2017)

## Extrusión de plásticos

La extrusión es un proceso en el cual se funden materiales para obtener productos que poseerán una sección transversal constante, estos se consiguen de forzar el paso de material fundido por una boquilla dando así una forma predefinida, posteriormente se debe enfriar el producto para evitar que este sufra alteraciones en sus dimensiones de forma permanente, el proceso de extrusión se lo realiza con máquinas denominadas extrusoras las cuales existen de diferentes tipos de mecanismos aunque las más usadas son las de tornillo simple. (Beltrán M & Marcilla A, 2023)

Comúnmente el plástico que se suministra como materia prima en la extrusora está en estado sólido y al ser procesado sale fundido, el polímero también puede ingresar en estado fundido procedente de pasar previamente por un reactor para lo cual la extrusora se convierte en una bomba que produce la presión necesaria para forzar el paso del polímero por la boquilla, cuando el ingreso de material se lo realiza en forma sólida y se funde en el proceso durante su paso por el usillo se realizan las siguientes funciones:

- Transportar el material sólido hacia la zona caliente de fusión
- Calentar hasta el estado plástico o punto de fusión
- Bombeo y aumento de presión en el material
- Mezclado
- conformado (Beltrán M & Marcilla A, 2023)

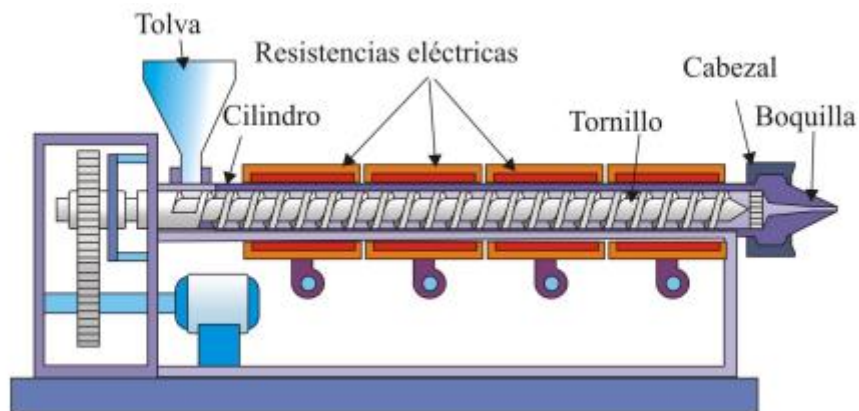
En una extrusora típica se tiene que el sistema de alimentación normalmente es una tolva en la que el material se suministra como polvo, escama PET o granza, para realizar la fusión se suministra calor por medio de resistencias eléctricas que son las encargadas de llevar al polímero hasta su punto de fusión dentro del cilindro caliente, el bombeo del material caliente y la presión necesaria para extruir el material por la boquilla se consiguen con el movimiento del tornillo sin fin que gira transportando al material desde la entrada



hasta la salida, al mismo tiempo que aumenta la presión para que este salga por la boquilla, estas partes descritas se aprecian en la figura 4. (Campos D & Caraway E, 2021)

#### Figura 4

*Partes de una extrusora de tornillo simple*



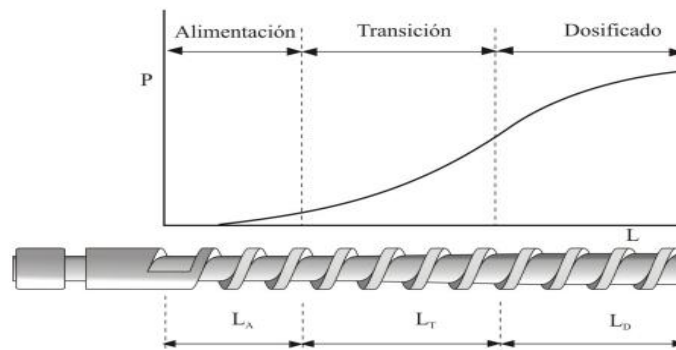
*Nota.* Se muestra todos los componentes de una maquina extrusora de plasticos.

Obtenido de: Interempresas

En las extrusoras se presentan 3 zonas presentes entre la entrada hasta la salida las cuales son la de alimentación, transición y dosificado, la que se encuentra al inicio y cerca de la tolva es la de alimentación, en esta zona se compacta el material en forma sólida para transportarlo a la velocidad necesaria hasta la siguiente zona que es la de transición en donde el material se compacta aún más aumentando la presión haciendo que el aire atrapado en los espacios escape en dirección a la tolva, en este lugar tambien se produce la fusión del polímero, al final tenemos la zona de dosificado cerca de la boquilla de extrusión en donde el material fundido ya es homogéneo y tiene la suficiente presión para pasar por el canal de la boquilla de extrusión, las zonas descritas se observan el figura 5. (Beltrán M & Marcilla A, 2023)

**Figura 5**

*Zonas de la extrusora y aumento de presión*



*Nota.* Se muestra las zonas presentes en uno proceso de extrusión. Obtenido de: Ferreira W.

## **Materiales, Equipos y Metodología**

### **Materiales:**

#### ***Envases reciclados***

Como materia prima para la obtención del filamento, se utilizará envases u otros elementos plásticos, los cuales al ser reciclados se les da un segundo uso reduciendo los desperdicios que terminan en basureros, ríos o el mar.

Los elementos recolectados con los cuales se inició el estudio son, tapas de botellas y sus envases de botellas PET, estos se los consigue fácilmente de recolectarlos en calles, canchas u otros lugares donde las personas desechan estos envases después del consumo de sus bebidas.

Otra opción para conseguir estos materiales es comprarlos al peso en centros de reciclaje, los cuales ya poseen una cantidad considerable dado que se dedican al acopio de estos envases de recicladores independientes y los venden por toneladas a empresas que procesan estos envases para darles una segunda vida.

## ***Equipos utilizados***

### ***Trituradora***

Las trituradoras de plástico son un conjunto de piezas y mecanismos que permiten obtener trozos de plástico, con lo cual facilitan el reciclaje de estos, reciben como materia de entrada en la tolva envases como botellas, tapas, tubos entre otros, estos son desgarrados en la cámara de trituración por las cuchillas, las cuales son de un material adecuado además de poseer un tratamiento térmico que les da mayor resistencia y dureza y permite realizar un corte adecuado, transformando así los envases plásticos en pequeños trozos los cuales ya pueden ser utilizados como materia prima en otras máquinas como la inyectora que produce piezas plásticas fundidas según la matriz que se use o la extrusora que funde estos trozos y los convierte en un hilo plástico el cual en este trabajo será utilizado como filamento para impresión 3D, la trituradora utilizada es la mostrada en la figura 6, la cual consta de cuchillas cementadas y afiladas para desgarrar los envases plásticos.

### **Figura 6**

*Máquina trituradora de plástico*



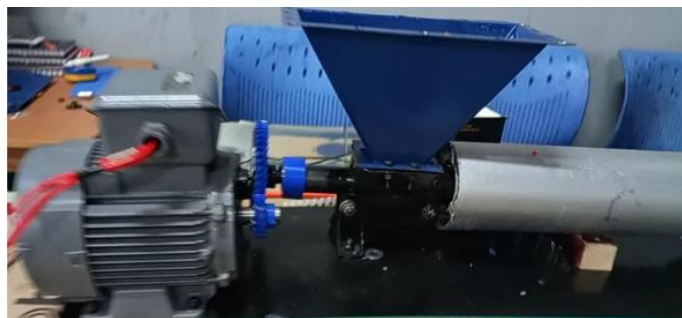
*Nota.* Máquina utilizada para la trituración de plásticos y obtención de la escama de estos

### ***Extrusora***

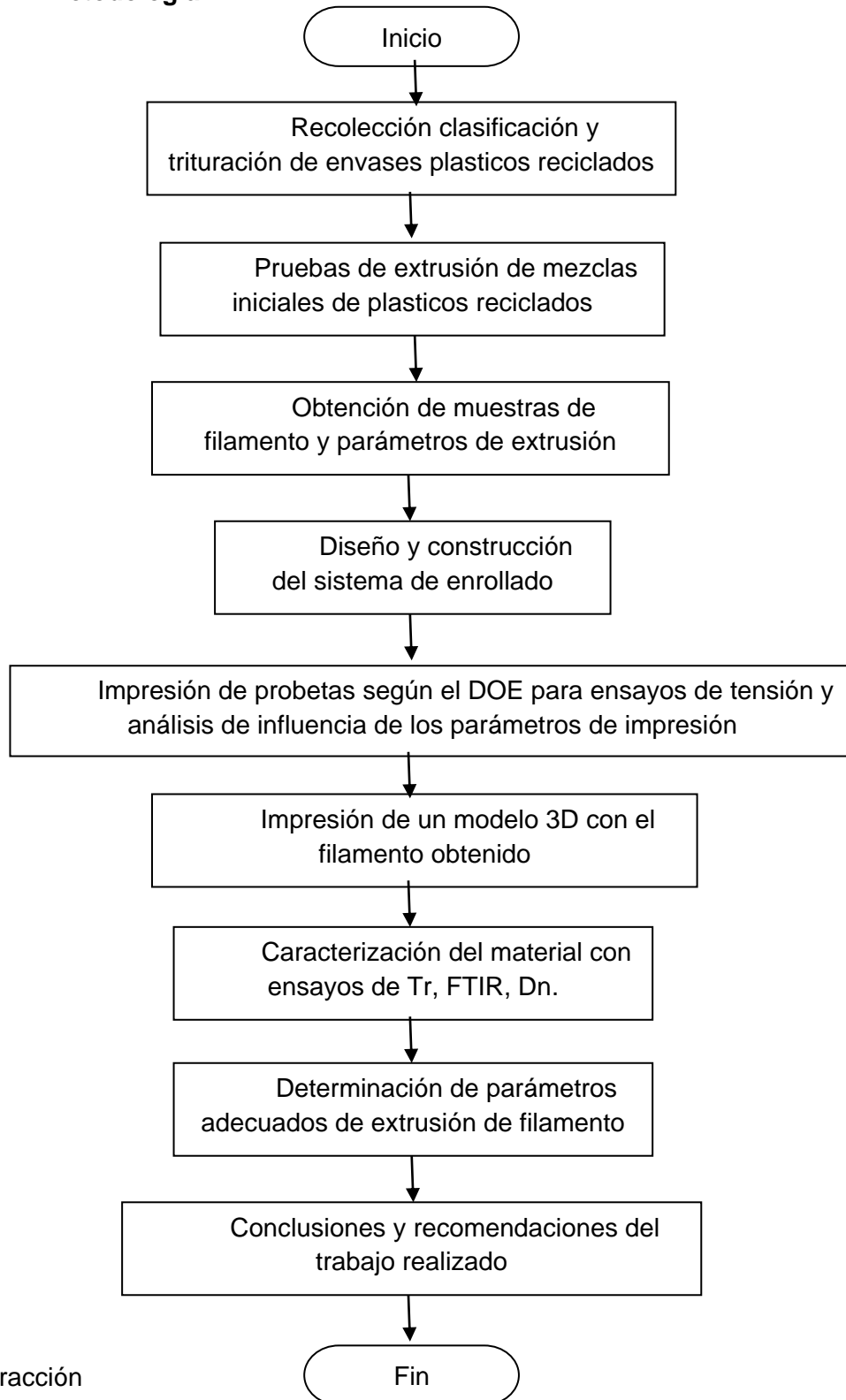
La extrusora será la encargada de fundir el plástico que se coloca en la tolva de alimentación, el cual al ser transportado dentro del cañón el cual está siendo calentado por las resistencias eléctricas transferirá calor al plástico hasta llegar a su temperatura de fusión estado en el cual todos los pedazos fundidos se mezclarán para formar una sola masa la cual debido a la presión interna que se genera es empujada a salir por la boquilla y tomar la forma de esta así como sus dimensiones, la extrusora utilizada es la que se observa en la figura 7, la cual consta de un motor trifásico de 750W, un banco de 5 resistencias de 200W, un tablero de control desde el cual se controla los parámetros de funcionamiento de la extrusora como la velocidad de extrusión, la temperatura.

**Figura 7**

*Extrusora de plástico*



*Nota.* Maquina extrusora utilizada para la fundición de plásticos y obtención de filamento

**Metodología**

Tr: Tracción

FTIR: Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier

DOE: Diseño de experimentos

Dn: Densidad

Para iniciar con se procederá a la recolección de los materiales necesarios para la investigación, los cuales consisten en botellas PET y tapas de polietileno. Estos materiales serán obtenidos de fuentes locales como centros de reciclaje, empresas de gestión de residuos o mediante recolección comunitaria.

Una vez obtenidos los materiales, se llevará a cabo su preparación para su posterior procesamiento. Esto incluirá la trituración y limpieza de los envases plásticos recolectados con el fin de eliminar cualquier contaminante o residuo presente. Además, se procederá a clasificar los plásticos triturados por tipo (PET y polietileno) siendo triturados cada uno por separado con el fin de evitar que los materiales se mezclen en proporciones desconocidas.

Posteriormente, se requiere el procesamiento de los materiales triturados utilizando una extrusora con la cual por medio de la adaptación de la boquilla será capaz de producir filamento para impresora 3D. Durante este proceso, se probarán mezclas de plásticos con el fin de evaluar si son aptas para producir filamento o no, se ajustarán parámetros como la temperatura y la velocidad de extrusión para fundir y mezclar los plásticos de manera homogénea. Se realizará un monitoreo constante de la calidad del filamento producido, asegurándose de que cumpla con las tolerancias requeridas para su uso en impresoras 3D y evitar que el filamento presente defectos de extrusión como partículas sin fundir, variación de diámetro acabado rugoso.

Una vez obtenido el filamento, se procederá a evaluar su idoneidad y rendimiento en la impresión de modelos 3D. Para ello, se realizarán pruebas con muestras del filamento en una impresora 3D obtenidas de diferentes configuraciones de parámetros de extrusión, registrando observaciones sobre la calidad de la impresión, la adherencia de las capas y la resistencia de los modelos impresos.

Además de la evaluación del filamento, se llevará a cabo la caracterización del material mediante una serie de ensayos. Esto incluirá ensayos de tensión para determinar

las propiedades mecánicas del filamento, así como el cálculo de su densidad mediante métodos estándar de laboratorio. También se realizarán análisis FTIR para identificar y caracterizar la composición química del material reciclado al analizar el espectro obtenido durante la prueba.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos y pruebas realizadas, evaluando la calidad y las propiedades del filamento reciclado. Con base en estos resultados, se sacarán conclusiones sobre la viabilidad del material reciclado para su uso en impresión 3D y se proporcionarán recomendaciones para futuras investigaciones o mejoras en el proceso de producción.

### ***Recolección mediante el reciclaje de plásticos***

#### ***Clasificación***

Para obtener la materia prima que será introducida en la tolva de alimentación de la extrusora es necesario primero recolectar los materiales, en el caso de las tapas de envases es necesario reunir una cantidad considerable, teniendo cuidado de no mezclar con otros tipos de plásticos que son elaborados con un termoplástico de un grupo diferente al del polietileno.

#### **Figura 8**

*Reciclaje de tapas de botellas*



*Nota.* Recolección y almacenamiento de tapas plásticas. Obtenido de: Agronet

Otro material a recolectar con el cual se evaluará si es factible obtener filamento es el PET el cual es de fácil obtención dado que la mayoría de envases de bebidas desechables están fabricados con este tipo de plástico, es transparente en su mayoría (figura 9), o algunos envases poseen color, este material puede ser obtenido de la recolección comunitaria o de su compra por kilos en centros de reciclaje.

### **Figura 9**

*Envases PET reciclados*



*Nota.* Recolección y almacenamiento de botellas plásticas PET. Obtenido de: Codex verde

### ***Trituración***

Las tapas de botellas recolectadas son previamente lavadas para eliminar las impurezas como grasas, tierra y otros residuos que pudieran contener, posteriormente son trituradas en trozos a los que se denomina escama de polietileno como se observa en la figura 10.

De igual manera las botellas PET deben pasar por un proceso de lavado eliminando residuos sólidos o líquidos que pudieran existir en el interior o exterior de estas.



**Figura 10**

*Restos de tapas triturados*



*Nota.* Escama de polietileno obtenida de triturar las tapas para usar en la extrusora

La escama tiene un tamaño adecuado con el cual el tornillo sin fin de la extrusora podrá ir empujándola hacia adentro del cañón para fundirla y mezclar todo uniformemente hasta obtener el filamento.

***Puesta a punto de la extrusora***

La extrusora debe ser capaz de fundir el material que se deposita en la entrada de la alimentación siendo estos los restos triturados de envases termoplásticos los cuales son desplazados hacia el interior del cañón caliente mediante el tornillo sin fin el cual obtiene su movimiento y fuerza para girar de un motor eléctrico trifásico de 0.75KW.

El equipo no se encontraba adecuado para su operación debido a que faltaban partes o adecuaciones y arreglos para que este pueda funcionar correctamente, las observaciones que se encontraron fueron:

- El tornillo sin fin no tenía ningún mecanismo para acoplarse al eje del motor.
- Control de temperatura en el tablero no encendía.
- Variador de frecuencia programado con tres velocidades no adecuadas.
- Las resistencias eléctricas en el cañón de la extrusora no calentaban

### Revisión de tablero eléctrico

La primera acción fue abrir el tablero de control y revisar todas las conexiones eléctricas en busca de algún cable fuera de lugar, flojo o faltante (figura 11), con un multímetro se verifico que los fusibles no estuvieran quemados, interruptores termomagnéticos, relés, contactores y botones funcionando correctamente.

### Figura 11

*Revisión del tablero de control*



*Nota.* Se muestra los componentes del tablero eléctrico de la extrusora que fueron revisados

Se encontraron cables sueltos sin estar apretados correctamente en su bornera correspondiente, al apretarlos y terminar de revisar las demás conexiones considerando que ya todo está en orden se procedió a realizar las conexiones en los cables de salida del tablero hacia las resistencias y las fases del motor.

Al energizar el tablero, accionando los botones y perillas correspondientes los relés funcionaron correctamente, además de que el controlador de temperatura ya entro en funcionamiento.

### **Desatasco y limpieza de las extrusora**

En la extrusora se realizó una limpieza de residuos plasticos degradados en el interior del cañón para lo cual fue necesario desacoplar todas las partes, las cuales fueron:

- Cañón
- Base
- Tornillo sin fin
- Boquilla

### **Figura 12**

*Desmontaje y revisión de componentes de la extrusora*



*Nota.* Limpieza de cañón, resistencias y tornillo sin fin de la extrusora

### **Armado de un banco de pruebas**

Todos los elementos de la extrusora, cañón, base, resistencias tablero de control se ensamblaron cada una en su posición, además de emperarlo a una base para sujetar todos sus elementos como se muestra en la figura 13.

Con la parte mecánica lista se procede a la parte eléctrica la cual consiste en conectar las resistencias eléctricas al tablero de control, estas producen el calor que será transferido al plástico en el interior del, así mismo conectar los cables de entrada que energizan al

motor trifásico con los cables de salida del variador de frecuencia en el tablero cada uno con su correspondiente fase verificando que el sentido de giro sea el correcto.

### Figura 13

*Ensamble de partes de la extrusora y prueba de funcionamiento*



*Nota.* Montaje de banco de pruebas para ensayos de filamento con plástico fundido

### Construcción de una nueva boquilla de salida

En la salida de la extrusora se acopla una nueva boquilla (figura 14), la cual facilitará que el filamento producido salga hacia abajo la cual estará construida con los siguientes materiales:

- Codo de 3/4 "de 90°
- Tuerca M16
- Perno M16
- Tapón hembra 32 mm

**Figura 14**

*Boquilla para extruir el filamento*



*Nota.* Se muestra los elementos que conforman la boquilla y armado de esta

***Determinación de cantidades de mezclas de plásticos y temperaturas de extrusión iniciales***

Para la obtención del filamento inicialmente se probó con dos diferentes termoplásticos que se obtenían del reciclaje, los cuales fueron el PET a partir de los envases de bebidas gaseosas o aguas y el polietileno obtenido de las tapas de los envases PET, los residuos triturados de estos plásticos fueron probados en la extrusora obteniendo los resultados que se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1***Materiales utilizados para obtener el filamento*

<b>Material</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Cantidad de mezcla</b>	<b>Temperatura utilizada</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>El material se funde demasiado dentro de la extrusora</li> </ul>		
Escama de envases de botellas PET	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se puede obtener un filamento</li> <li>El material se degrada dentro de la extrusora</li> <li>Taponamiento continuo de la boquilla de extrusión</li> <li>El material se funde y mezcla dentro de la extrusora</li> </ul>	100% PET	130°C -180°C
Escama de polietileno de tapas de envases	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se obtiene un filamento extruido</li> <li>El material se empieza a degradar solo si se sobrepasa los 220°C en la extrusora</li> </ul>	100% Tapas de envases (Polietileno)	140°C - 200°C

*Nota.* Se muestra los materiales con los que se realizó pruebas de obtención de filamento los parámetros usados y las características del filamento obtenidas.

De los resultados obtenidos de la tabla 1 se concluyó que no es posible obtener filamento a partir de PET, por lo cual las pruebas para obtener un filamento se realizaron

con la escama obtenida de triturar las tapas de envases desechables de bebidas que son de (PELD).


### ***Obtención de muestras de filamento extruido***

Con las pruebas iniciales se busca cuáles son los parámetros de temperatura y frecuencia del variador a configurar en los equipos para obtener un filamento que sea adecuado para la impresora, que no presente defectos de extrusión como partículas sin fundir, superficie rugosa y variación de diámetro, este será elaborado con la escama obtenida de triturar las tapas de envases plasticos las cuales son de polietileno de baja densidad (PELD).

El rango de temperaturas con el que se inicia las pruebas varía entre 130°C y 210°C, y el de temperatura está dentro de (3-12) Hz, a continuación, se presentan las muestras iniciales de filamento obtenidas durante las pruebas para obtener los parámetros de funcionamiento de la extrusora.

**Tabla 2**

*Obtención de muestras de filamento*

<b>Muestra de filamento</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Observaciones</b>
	Temperatura 150°C Frecuencia 4HZ	Superficie rugosa Diámetro variable Filamento grueso Inadecuado para ser usado en impresión 3D

	Temperatura 210°C Frecuencia 4HZ	Diámetro variable Defecto de piel de tiburón Demasiada temperatura Inadecuado para ser usado en impresión 3D
	Temperatura 160°C Frecuencia 7HZ	Superficie lisa Diámetro poco variable Poco adecuado para ser usado en impresión 3D
	Temperatura 180°C Frecuencia 5Hz	Superficie lisa El filamento presenta poca variación del diámetro Muestra adecuada para pruebas de impresión 3D

*Nota.* Características del filamento de polietileno obtenidas de probar diferentes parámetros.

De la tabla 2 se observa las muestras obtenidas y los resultados de variar la temperatura de la extrusora y la frecuencia del variador que es la que controla la velocidad del tornillo sin fin que a su vez tiene relación con el tiempo de permanencia del plástico dentro del cañón de la extrusora el cual influye en que este se funda correctamente.

De las muestras obtenidas se observó que un filamento adecuado el cual es, liso y con poca variación de diámetro se obtiene con una temperatura entre 150°C y 190°C con una frecuencia en el variador entre 4 y 7 Hz.



### **Diseño y fabricación de un sistema de enrollado del filamento**

Para el dimensionamiento del sistema de enrollado se requiere conocer los parámetros de funcionamiento tales como potencia requerida, rpm en la salida para lo cual primero es necesario obtener estos datos.

#### **Fuerza para el trefilado del filamento**

El mecanismo diseñado tendrá dos usos según el proceso en el que se use, en la extrusión del filamento será usado como enrolladora del filamento obtenido, recolectando para ser usado en un proceso de trefilado posterior.

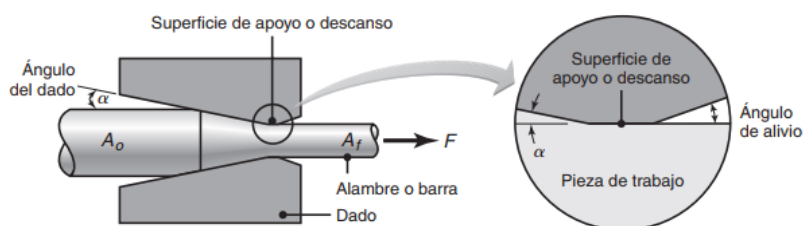
En el proceso de trefilado el mecanismo será utilizado como una bobina de halado la cual producirá la tensión y fuerza necesaria para que el filamento atraviese el dado en el cual se está reduciendo su diámetro a 1.75mm (figura 15).

#### **Figura 15**

##### *Proceso de trefilado*

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \left[ \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left( \frac{A_o}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (15.4)$$

en donde  $\alpha$  es el ángulo del dado en radianes.



*Nota.* Ecuación y variables del proceso de trefilado. Obtenido de: Fundamentos de manufactura moderna Groover

Fuerza de trefilado

*Diametro inicial*  $D_o = 2.56\text{mm}$

*Diametro final*  $D_f = 1.75\text{mm}$

$$\text{Área inicial } A_o = \frac{\pi * D_o^2}{4} = \frac{\pi * 2.56^2}{4} = 5.147 \text{ mm}^2$$

EC 1

EC 2

$$\text{Área final } A_f = \frac{\pi * D_f^2}{4} = \frac{\pi * 1.75^2}{4} = 2.405 \text{ mm}^2$$

*Coefficiente de fricción*  $\mu = 0.25$

*Ángulo de entrada*  $20^\circ * \frac{\pi}{180^\circ} = 0.349 \text{ rad}$

$\sigma_{yPELD} = 30 \text{ MPa}$  Tomado de: Procesos de manufactura Schey

**Fuerza necesaria para trefilar el filamento**

EC 3

$$F = \sigma_{yPP} * A_f * \left[ \left(1 - \frac{\mu}{\alpha}\right) * \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) + \frac{2}{3}\alpha \right]$$

$$F = 30 \text{ MPa} * 2.405\text{mm}^2 * \left[ \left(1 - \frac{0.25}{0.349}\right) * \ln\left(\frac{5.147\text{mm}^2}{2.405\text{mm}^2}\right) + \frac{2}{3} * 0.349 \right] = 32.37 \text{ N}$$

Draft

$$\text{Draft} = D_o - D_f$$

$$\text{Draft} = 2.56\text{mm} - 1.75\text{mm} = 0.81\text{mm}$$

EC 4

Porcentaje de reducción de área

$$\%R = \frac{D_o^2 - D_f^2}{D_o^2} * 100$$

EC 5

$$\%R = \frac{2.56^2 - 1.75^2}{2.56^2} * 100 = 53.27 \%$$

### Velocidad de extruido del filamento

Este parámetro se calculó mediante la medición de distancia y tiempos en los cuales el filamento al ser extruido recorría 10cm llegando a una velocidad promedio de:

$$v = 0.018 \frac{m}{s}$$

El filamento será enrollado en un carrete vacío de un filamento comercial el cual posee un diámetro de:

$$D_{carrete} = 0.094m$$

Con estos datos se calculan las rpm que tendrá el carrete al momento de enrollar, y se le aumento un 20% más rápido con lo cual se tendrá un margen al cual se podrá ajustar a la velocidad adecuada mediante un circuito eléctrico de variación de voltaje que permitirá ajustar la velocidad del motor.

$$W_{carrete} = \frac{2 * v * 60 * 1.2}{D_{carrete} * 2\pi} = \frac{2 * 0.018 \frac{m}{s} * 60 * 1.2}{0.094m * 2\pi} = 4.41 \text{ rpm}$$

EC 6

### Torque de salida necesario

El par de torsión que se requiere en el carrete que almacena el filamento esta dado por la fuerza del trefilado necesario y el diámetro del carrete.

$$D_{carrete} = 0.094m$$

$$T_{carrete} = F * \frac{D_{carrete}}{2}$$

EC 7

$$T_{carrete} = 32.37 \text{ N} * \frac{0.094m}{2} = 1.51 \text{ Nm}$$

### Potencia de salida

$$Pot_{salida} = \frac{T_{carrete}}{W_{carrete}}$$

EC 8

$$Pot_{salida} = \frac{1.51 Nm * 2\pi}{4.41rpm * 60} = 0.69 W$$

### Selección de motor

El movimiento será producido por un motor eléctrico el cual sea capaz de satisfacer con la potencia necesaria para la reducción mecánica del sistema de enrollado, se optó por un motor eléctrico DC de 12W (figura 16), el cual es tiene las siguientes especificaciones:

#### Figura 16

*Motor eleva lunas*



Especificaciones del motor	
<b>Corriente</b>	1.5 A
<b>Voltaje</b>	12 V
<b>Velocidad</b>	110 rpm
<b>Torque</b>	1.65 Nm

*Nota.* Motor seleccionado para el mecanismo y características de este. Obtenido de: Autodoc

### Selección de módulo de engranajes

Con base en la tabla del libro de máquinas y mecanismos de Myszka conocidas las rpm y la potencia necesaria se procede a la selección de un módulo adecuado para los engranajes para los datos de:

$$Potencia = 12 w \approx 0.016hp$$

$$Velocidad = 110rpm$$

**Tabla 3**

*Pasos diametrales adecuados para engranajes con ángulo de presión de 20°*

Potencia	rpm del piñón					
hp	50	100	300	600	900	1200
0.05	20	20	24	32	32	32
0.10	16	20	20	24	24	24

*Nota.* Tabla usada para la obtención del paso diametral. Obtenido de: Máquinas y mecanismos Myszka

$$Pd = 20$$

$$m = \frac{25.4}{Pd}$$

EC 9

$$m = \frac{25.4}{20} = 1.27m$$

**Tabla 4**

*Módulos métricos estandarizados*

1	4
1.25	5
1.5	6
2	8
2.5	10
3	12

*Nota.* Tabla usada para la obtención del módulo estandar del engranaje. Obtenido de: Máquinas y mecanismos Myszka

De la tabla se selecciona el módulo superior más cercano siendo de

$$m = 1.5mm$$

$$R_{caja} = \frac{W_{carrete}}{W_{motor}} = \frac{4.41 \text{ rpm}}{110 \text{ rpm}} = 0.04$$

EC 10

Para evitar que se produzca interferencia se selecciona de la tabla 5 una combinación de piñón y engranaje dentro del rango que indica, estos con un ángulo de presión de 20°.

**Tabla 5**

*Combinación de dientes para eliminar interferencia*

TABLA 10.4 Combinaciones de dientes de engrane para eliminar la interferencia					
$\phi = 14^\circ$		$\phi = 20^\circ$		$\phi = 25^\circ$	
Número de dientes del piñón	Número máximo de dientes del engrane	Número de dientes del piñón	Número máximo de dientes del engrane	Número de dientes del piñón	Número máximo de dientes del engrane
< 23	Interferencia	< 13	Interferencia	< 9	Interferencia
23	26	13	16	9	13
24	32	14	26	10	32
25	40	15	45	11	249
26	51	16	101	12	$\infty$
27	67	17	1309		
28	92	18	$\infty$		

*Nota.* Tabla usada para la obtención de dientes de engranajes que cumplan la relación sin producir interferencia. Obtenido de: Máquinas y mecanismos Myszka

Se prueban combinaciones de dientes hasta obtener la relación de la caja reductora calculada anteriormente obteniendo lo siguiente:

$$R_{caja} = \frac{16}{36} * \frac{18}{46} * \frac{18}{78} = 0.04$$

**Tabla 6**

*Resumen de engranajes seleccionados y las rpm a las que trabajan*

<b>Engranaje</b>	<b>Dientes</b>	<b>RPM</b>
Z1	78	4,41
Z2	18	19,13
Z3	46	19,13
Z4	18	48,89
Z5	36	48,89
Z6	16	110,00

*Nota.* Se muestran los dientes de cada engranaje y las revoluciones a las que funcionarán.

### **Calidad de los engranajes**

**Tabla 7**

*Calidad de los engranajes según la AGMA*

**TABLA 9-2** Números de calidad AGMA recomendados

Aplicación	Número de calidad	Aplicación	Número de calidad
Accionamiento de tambor			
mezclador de cemento	3-5	Taladro pequeño	7-9
Horno de cemento	5-6	Lavadora de ropa	8-10
Impulsores de laminadoras de acero	5-6	Prensa de impresión	9-11
Cosechadora de granos	5-7	Mecanismo de cómputo	10-11
Grúas	5-7	Transmisión automotriz	10-11
Prensas de punzonado	5-7	Accionamiento de antena de radar	10-12
Transportador de mina	5-7	Accionamiento de propulsión marina	10-12

*Nota.* Se muestra los tipos de mecanismo y los números de calidad correspondientes.

Obtenido de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

Calidad seleccionada 6, impulsoras de laminadora

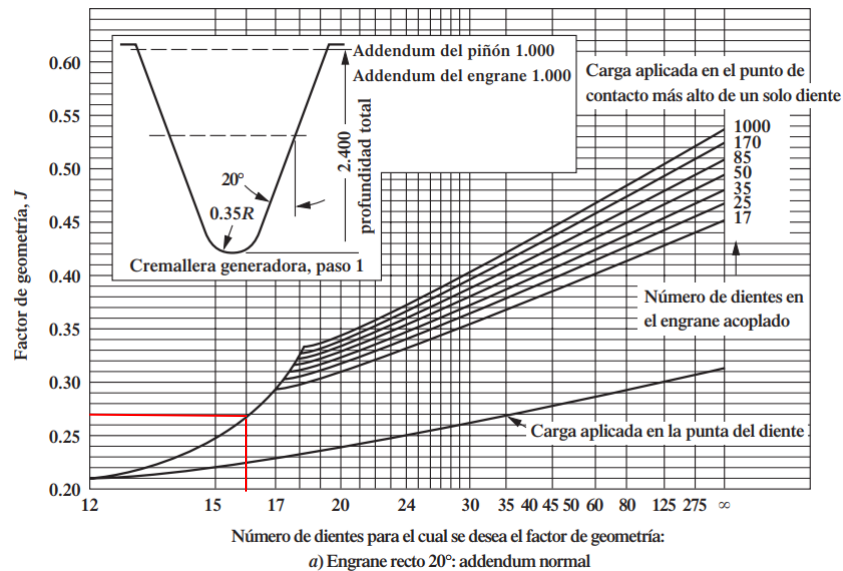
### **Factor de geometría**

Para los engranes Z6 con 16 dientes y Z5 36

Para el engranaje Z6 se obtuvo el valor de:

**Figura 17**

Gráfica para obtener el factor de geometría



*Nota.* Se muestra la gráfica para la obtención del factor de geometría de los engranajes. Obtenido de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

$$J = 0.27$$

### Factor de sobrecarga $K_o$

Con los criterios descritos a continuación se elige el tipo de la fuente de potencia y el de la máquina impulsada.

Uniformes: Motor eléctrico o turbina de gas a velocidad constante

Choque ligero: Turbina hidráulica e impulsor de velocidad variable

Choque moderado: Motor multicilíndrico



**Tabla 8***Factores de sobrecarga***TABLA 9-5** Factores de sobrecarga sugeridos,  $K_o$ 

Fuente de potencia	Máquina impulsada			
	Uniforme	Choque ligero	Choque moderado	Choque pesado
Uniforme	1.00	<u>1.25</u>	1.50	1.75
Choque ligero	1.20	1.40	1.75	2.25
Choque moderado	1.30	1.70	2.00	2.75

*Nota.* Especificaciones para la selección del factor de sobrecarga según los mecanismos usados. Obtenido de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

La fuente de potencia es un motor eléctrico DC por lo cual el criterio es uniforme y como la transmisión se tomó como choque ligero por lo cual el factor de sobrecarga es:

$$K_o = 1.25$$

**Factor de tamaño****Tabla 9***Factor de tamaño***TABLA 9-6** Factores de tamaño sugeridos,  $K_s$ 

Paso diametral, $P_d$	Módulo métrico, $m$	Factor de tamaño, $K_s$
$\geq 5$	$\leq 5$	<u>1.00</u>
4	6	1.05
3	8	1.15
2	12	1.25
1.25	20	1.40

*Nota.* Criterios de selección del factor de tamaño según el módulo del engranaje. Obtenido de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

El módulo seleccionado de los engranajes es 1.5mm se selecciona un factor de tamaño de:

$$K_s = 1$$

### Tabla 10

*Factor de confiabilidad*

**TABLA 9-8** Factor de confiabilidad,  $K_R$

Confiabilidad	$K_R$
0.90, una falla en 10	0.85
<u>0.99, una falla en 100</u>	<u>1.00</u>
0.999, una falla en 1000	1.25
0.9999, una falla en 10 000	1.50

*Nota.* Selección del factor de confiabilidad con probabilidad de una falla cada 100

Tomado de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

Se selecciona una confiabilidad de que presente una falla en 100, con una de 0.99 se obtiene el factor de:

$$K_R = 1$$

### Factor de distribución de carga

El factor será calculado mediante la siguiente ecuación

$$K_m = 1.0 + C_{pf} + C_{ma}$$

EC 11

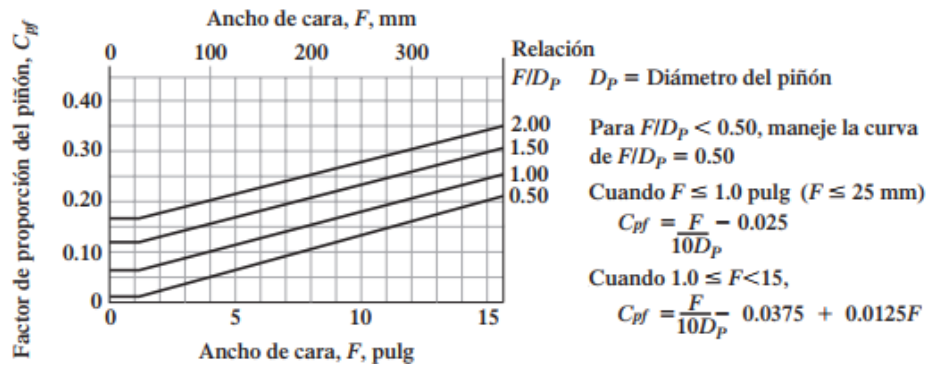
Donde:

$C_{pf}$ : Factor de proporción del piñón

$C_{ma}$ : Factor por alineamiento de engranado

Figura 18

Gráfica para obtener factor  $C_{pf}$  de proporción de piñón



Nota. Cálculo del factor de proporción de piñón. Obtenido de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

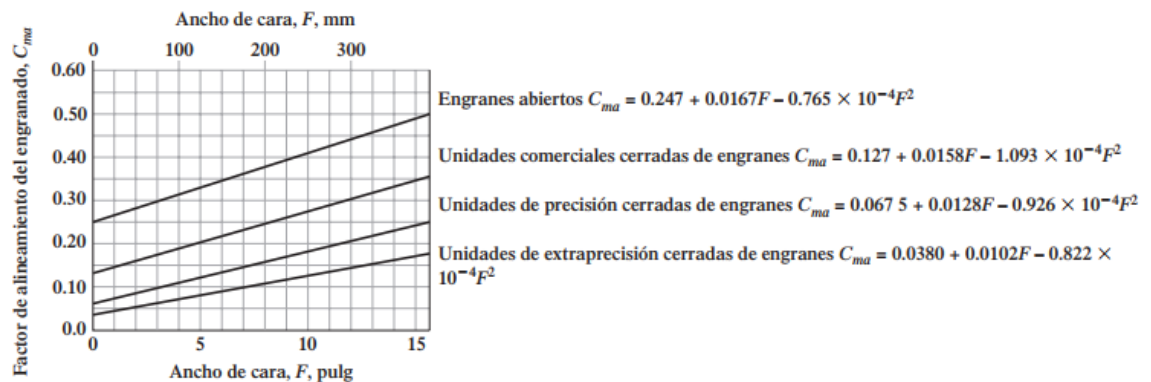
El ancho de cara de cara del piñón 19mm es <25mm se utiliza la ecuación:

$$C_{pf} = \frac{F}{10D_p} - 0.025 \quad EC 12$$

$$C_{pf} = \frac{19}{10 * 24} - 0.025 = 0.054$$

Figura 19

Gráfica para obtener factor  $C_{ma}$  por alineamiento de engranado



Nota. Cálculo del factor de alineamiento de engranado. Obtenido de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

$$C_{ma} = 0.247 + 0.016F - 0.765 * 10^{-4}F^2$$

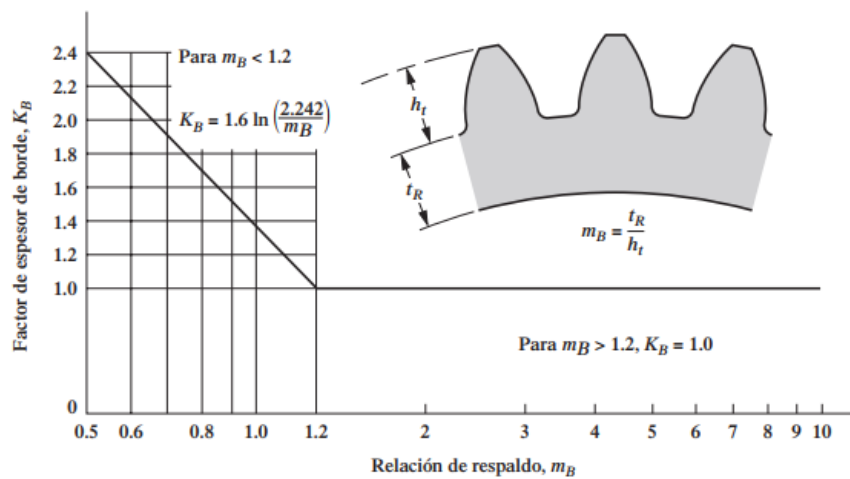
$$C_{ma} = 0.247 + 0.016 * 19 - 0.765 * 10^{-4}(19)^2 = 0.48$$

$$K_m = 1.0 + 0.054 + 0.48 = 1.53$$

### Factor de espesor de orilla

**Figura 20**

Gráfica para obtener factor de espesor de orilla



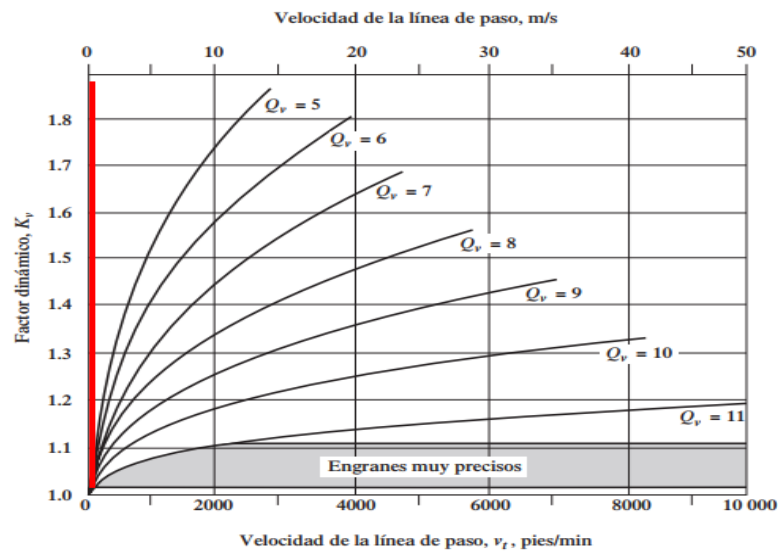
*Nota.* Cálculo del factor de espesor de orilla según el diseño del engranaje. Tomado de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

$$K_B = 1.2$$

### Factor dinámico

Figura 21

Gráfica para obtener factor dinámico



Nota. Obtención grafica del factor dinámico para los engranajes. Obtenido de: Diseño de elementos de máquinas de Mott

Velocidad en la línea de paso para el piñón Z6

$$V = 0.138 \frac{m}{s}$$

Calidad del engranaje 6

$$K_V = 1$$

**Esfuerzo en el piñón**

Factor de seguridad adicional  $S_f = 1.25$

$$S_t = \frac{W_t}{m * F * J} * K_o * K_s * K_m * K_B * K_v * S_f$$

EC 14

$$S_t = \frac{5.06N}{1.5m * 0.27} * 1.25 * 1 * 1.53 * 1.1 * 1 * 1.25 = 1.736 MPa$$

**Factor de seguridad**

Esfuerzo de flexión para PLA impreso  $\sigma_{PLA} = 30 MPa$

Factor de seguridad calculado

$$Factor\ seguridad = \frac{\sigma_{PLA}}{S_t}$$

EC15

$$\text{Factor seguridad} = \frac{30 \text{ MPa}}{1.736 \text{ MPa}} = 17.28$$

### Factores

$K_o$ : Factor de sobrecarga para resistencia flexionante

$K_v$ : Factor dinámico para la resistencia flexionante

$K_s$ : Factor de tamaño para la resistencia flexionante

$C_{pf}, C_{ma}$ : Factor de distribución de carga

$K_m$ : Factor de distribución de carga para la resistencia flexionante

$K_B$ : Factor de espesor de aro

SF: Factor de seguridad

St: Esfuerzo flexionante

Yn: Esfuerzo flexionante AGMA

$\sigma_{PLA 50\%}$ : Esfuerzo flexión del PLA impresión 3d 50% relleno

**Tabla 11**

*Parámetros de los engranajes*

Engranaje	Modulo mm	RPM	Dientes	Diámetro primitivo mm	Fuerza tangencial N	Velocidad tangencial m/s	Ancho de cara B mm
<b>Z1</b>	1,5	4,41	78	117	25,89	0,027	15
<b>Z2</b>	1,5	19,13	18	27	25,89	0,027	19
<b>Z3</b>	1,5	19,13	46	69	10,13	0,069	15
<b>Z4</b>	1,5	48,89	18	27	10,13	0,069	19
<b>Z5</b>	1,5	48,89	36	54	5,067	0,138	15
<b>Z6</b>	1,5	110,00	16	24	5,067	0,138	19

*Nota.* Parámetros y fuerzas calculados de los engranajes.

**Tabla 12***Factores de diseño de engranajes*

Engranaje	$K_o$	$K_v$	$K_s$	$C_{fp}$	$C_{ma}$	$K_m$	$K_B$	$St$ MPa	$Y_n$ MPa	SF	$\sigma_B =$	$\sigma_{PLA 50\%}$	Factor de seguridad calculado
											$\frac{St}{SF}$ MPa		
<b>Z1</b>	1,25	1	1	0,045	0,480	1,526	1,1	5,818	5,818	1,25	7,272	30	4,13
<b>Z2</b>	1,25	1	1	0,045	0,480	1,526	1,1	5,957	5,957	1,25	7,446	30	4,03
<b>Z3</b>	1,25	1	1	0,045	0,480	1,526	1,1	2,422	2,422	1,25	3,028	30	9,91
<b>Z4</b>	1,25	1	1	0,045	0,480	1,526	1,1	2,368	2,368	1,25	2,960	30	10,14
<b>Z5</b>	1,25	1	1	0,054	0,480	1,534	1,1	1,320	1,320	1,25	1,650	30	18,19
<b>Z6</b>	1,25	1	1	0,054	0,480	1,534	1,1	1,389	1,389	1,25	1,736	30	17,28

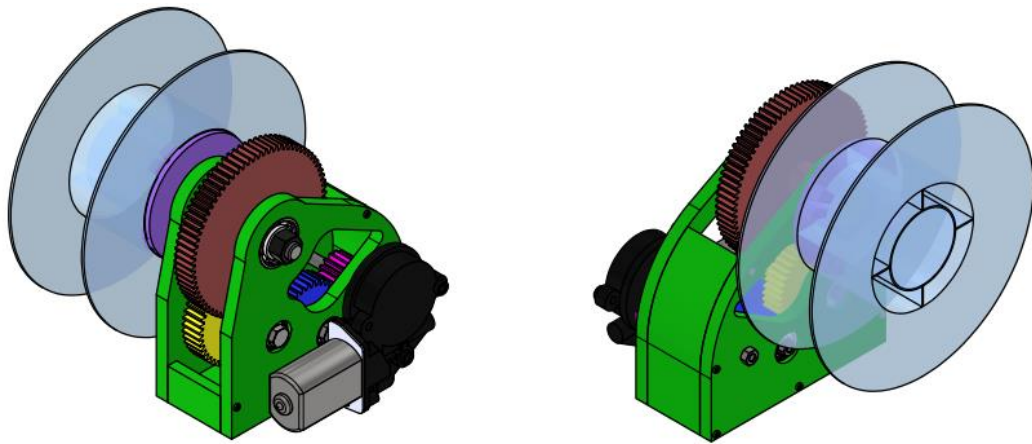
*Nota.* Factores de diseño y esfuerzos calculados en los engranajes.

### **Diseño CAD y fabricación del del sistema de enrollado**

Con base en los calculos de la transmisión diseñada anteriormente se realizó el diseño de los elementos faltantes como lo son la caja que fijara los engranajes, brazo giratorios que sujetaran el carrete para enrollar además de transmitir la fuerza para esa acción, el modelo diseñado a construir es el mostrado en la figura 22 en el cual se observan los componentes que serán necesarios a través de una vista isométrica, en la figura 23 en cambio se observa el modelo ya construido, este fue realizado mediante impresión 3D con material PLA+.

**Figura 22**

*Diseño CAD del sistema de enrollado*



*Nota.* Diseño 3D del mecanismo de enrollado con la transmisión calculada.

**Figura 23**

*Impresión 3D y ensamblaje de componentes del sistema de enrollado*



*Nota.* Impresión 3D del mecanismo de enrollado y armado del mismo.

***Implementación del diseño de experimentos (DOE), para obtener un filamento adecuado a partir de los ensayos anteriores***

Un diseño de experimentos (DOE) es una herramienta importante en una investigación debido a que ayuda a plantear los pasos a seguir para una toma de datos de determinadas



variables de un producto o proceso y las cuales serán analizados más adelante, siendo el objetivo de obtener la mayor cantidad de información necesaria, pero con una mayor eficiencia y un coste reducido, sin embargo, se debe conocer que es lo que se está buscando. (Fernández Sheila, 2020)

Las aplicaciones más comunes de un diseño de experimentos son:

- Establecer relaciones de causa efecto entre las variables de entrada y las de salida.
- Identificar que parámetros tienen mayor influencia en el proceso o producto
- Mejorar un proceso aumentando la eficiencia o rendimiento
- Obtener un modelo algebraico que predice un resultado con la influencia de varios factores.

El diseño de experimentos está enfocado a analizar cómo influye en los modelos impresos el sentido de orientación de la fibra, siendo estas paralelas o transversales a la longitud de las probetas y el ángulo de orientación de impresión con respecto del eje X de la impresora al esfuerzo que estos pueden soportar hasta que se produce la falla mecánica la cual consiste en que el material entra en la zona de fluencia, en la tabla 13 se observa las combinaciones a realizar para realizar este análisis y evaluar la importancia de cada factor.

**Tabla 13***Combinación de condiciones para la realización del DOE*

<b>OrdenEst</b>	<b>OrdenCorrida</b>	<b>TipoPt</b>	<b>Bloques</b>	<b>Ángulo °</b>	<b>Sentido</b>	<b>Esfuerzo MPa</b>
1	1	1	1	0	Paralelo	17,55
2	2	1	1	0	Transversal	7,45
3	3	1	1	45	Paralelo	18,33
4	4	1	1	45	Transversal	2,2
5	5	1	1	90	Paralelo	17,36
6	6	1	1	90	Transversal	7,2
7	7	1	1	0	Paralelo	14,71
8	8	1	1	0	Transversal	8,34
9	9	1	1	45	Paralelo	17,75
10	10	1	1	45	Transversal	4,23
11	11	1	1	90	Paralelo	10,65
12	12	1	1	90	Transversal	8,49
13	13	1	1	0	Paralelo	16,56
14	14	1	1	0	Transversal	3,13
15	15	1	1	45	Paralelo	15,46
16	16	1	1	45	Transversal	4,11
17	17	1	1	90	Paralelo	18,68
18	18	1	1	90	Transversal	10,55

*Nota.* Obtención de combinación de parámetros de ensayos y resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

## Resultados obtenidos de Minitab

**Tabla 14**

*Información del factor*

<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
Ángulo	3	0; 45; 90
Sentido	2	Paralelo; Transversal

*Nota.* Factores que a analizar usando el DOE.

**Tabla 15**

*Resumen del modelo*

<b>S</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad. (ajustado)</b>	<b>R-cuad. (pred)</b>
2,40973	87,95%	82,93%	72,89%

*Nota.* Valores resultados del ajuste realizado con Minitab.

**Tabla 16**

*Coefficientes*

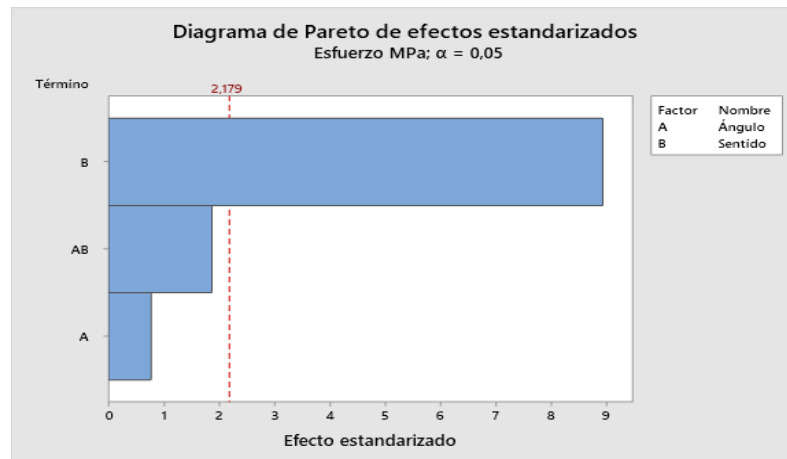
<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del</b>		<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
		<b>coef.</b>	<b>Valor T</b>		
Constante	11,264	0,568	19,83	0,000	
Ángulo					
0	0,026	0,803	0,03	0,975	1,33
45	-0,917	0,803	-1,14	0,276	1,33
Sentido					
Paralelo	5,075	0,568	8,94	0,000	1,00
Ángulo*Sentido					
0 Paralelo	-0,092	0,803	-0,11	0,911	1,33

45 Paralelo 1,758 0,803 2,19 0,049 1,33

*Nota.* Coeficientes del DOE obtenidos con Minitab

**Figura 24**

*Diagrama de relevancia de los parámetros*



*Nota.* Se observa que parámetros si influyen en el esfuerzo que soportan las probetas y cuáles no.

De las variables analizada las cuales son la orientación de la fibra y el ángulo de orientación de impresión con respecto al eje X de la impresora, en la figura 24 se observa que la más significativa y que afecta más al esfuerzo que resiste la probeta es la orientación de la fibra, dado que en sentido transversal la probeta falla rápidamente por delaminación de sus capas impresas, mientras que en sentido paralelo la probeta falla como lo haría comúnmente un plástico presentando una zona de fluencia bastante amplia.

### ***Impresión de modelos con el filamento obtenido***

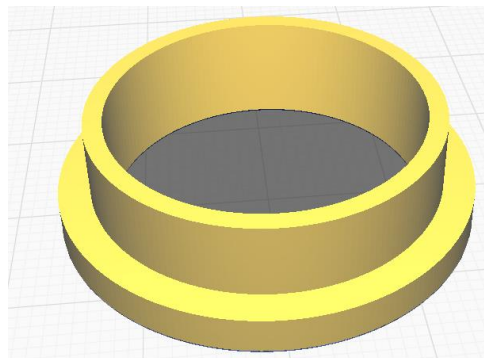
Con las muestras de filamento obtenidas ya adecuadas se procede a realizar en una impresora 3D pruebas para analizar si el filamento obtenido puede ser usado para la manufactura aditiva por FDM

### Modelo de pruebas

Se diseña un elemento sencillo mostrado en la figura 25, con el cual se probará el filamento y se determinará los parámetros de uso

### Figura 25

*Modelo CAD para impresión*



*Nota.* Diseño CAD de un modelo para ser impreso en 3D.

El modelo debe ser importado como formato STL a un software que procese el modelo y genere el código G, con el cual la impresora construirá el objeto capa por capa, el software utilizado es Cura como se muestra a continuación.

Se deben configurar parámetros de temperatura en el extrusor y la cama además de la velocidad a la que se realizara la impresión, estos datos fueron tomados base de la ficha técnica que proporciona 3DX FACTORY MX y se muestran en la tabla 14, empresa que comercializa filamento de polietileno

### Tabla 17

*Parámetros de impresión de filamento comercial*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de extrusor	(175- 215) °C
Temperatura de la cama	(60-100) °C
Velocidad de impresión	50 mm/s
Flujo	100%

*Nota.* Parámetros de impresión para el filamento de polietileno. Obtenido de: 3DX FACTORY MX

Al realizar unas primeras pruebas se observó que se requería más temperatura en el extrusor, que el ventilador de capa debía estar apagado para evitar warping y que la pieza se despegue de la cama de impresión por lo cual se probó que con los parámetros mostrados a continuación se puede obtener un modelo impreso con buenas características a partir del filamento elaborado de material reciclado, los parámetros configurados para la impresión del modelo se muestran en las figuras 26 y 27.

**Figura 26**

*Configuración de parámetros de impresión*

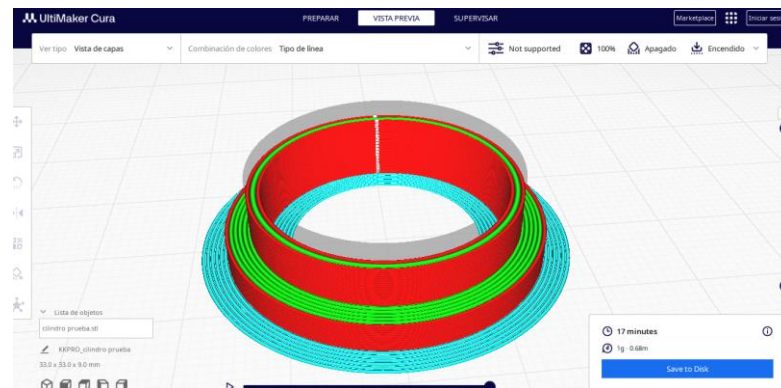
The screenshot displays the 'Ajustes de impresión' (Print Settings) window in Cura. The interface is split into two panes. The left pane shows settings for 'Calidad' (Quality) and 'Paredes' (Walls). The right pane shows settings for 'Temperatura de impresión' (Print Temperature), 'Flujo' (Flow), 'Velocidad' (Speed), and 'Desplazamiento' (Retraction).

Categoría	Parámetro	Valor	Unidad
Calidad	Altura de capa	0.2	mm
	Altura de capa inicial	0.2	mm
Paredes	Grosor de la pared	0.88	mm
	Recuento de líneas de pared	5	
	Orden de paredes	Del exterior al inte...	
Temperatura de impresión	Temperatura de impresión	240.0	°C
	Temperatura de impresión de la capa inicial	240.0	°C
	Temperatura de la placa de impresión	40.0	°C
Flujo	Flujo	85.0	%
Velocidad	Velocidad de impresión	45.0	mm/s
	Velocidad superior/inferior	35.0	mm/s
Desplazamiento	Habilitar la retracción	<input checked="" type="checkbox"/>	

*Nota.* Configuración de parámetros de impresión en el software cura.

**Figura 27**

*Laminado de modelo STL previamente diseñado*



*Nota.* Laminación de modelo 3D diseñado para obtener el código G en cura.

Con los parámetros configurados se carga el código G generado por el software en la impresora 3D, además de colocar el filamento obtenido de material reciclado en el tren de arrastre y extrusor de la impresora, al finalizar se obtiene el modelo impreso como se observa en la figura 28, el cual presenta un buen acabado superficial y una buena resistencia debido a la adherencia entre sus capas de impresión, con esto se comprueba que el filamento obtenido de plásticos reciclados es adecuado para ser usado en impresoras 3D convencionales y es capaz de producir modelos impresos de buena calidad.

**Figura 28**

*Modelo impreso con el filamento de material reciclado*



*Nota.* Se observa el modelo impreso en 3D obtenido con el filamento obtenido.

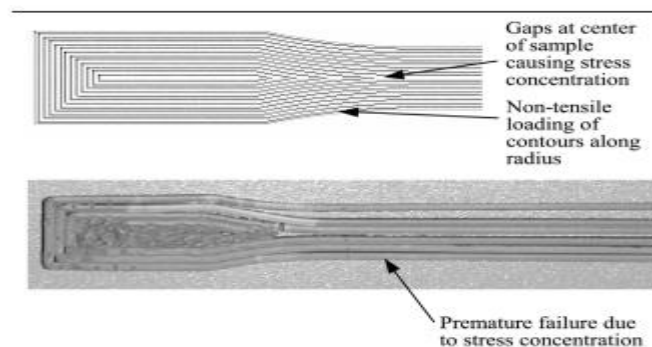
## Caracterización del nuevo material

### Ensayo de tracción

Se diseñan las probetas para los ensayos a tracción con base en la norma ASTM D638, la forma tradicional de la probeta propuesta en esta norma debido al proceso de fabricación de las probetas realizado con impresión 3D, provoca una falla prematura por delaminación de las capas debido a la concentración de esfuerzos producida en los cambios de sección transversal como se observa en la figura 29, por lo cual las probetas serán con forma rectangular con dimensiones de 200mm de largo, 25.4mm de ancho y 3.2mm de espesor.

**Figura 29**

*Falla prematura de probetas impresas en 3D con la forma convencional*



*Nota.* Muestra de cómo las probetas impresas en 3D fallan prematuramente. Tomado de: Sung-Hoon Ahn, Propiedades del material anisotrópico

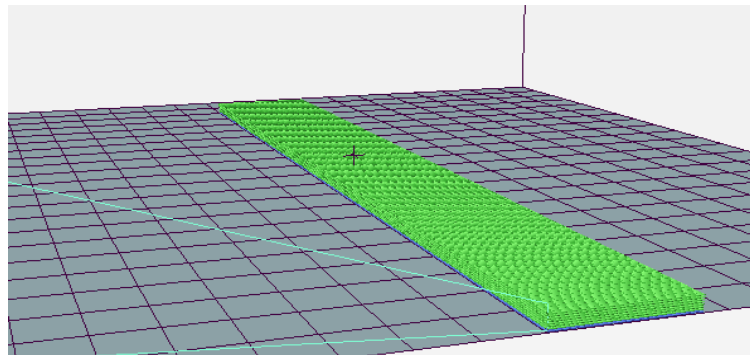
Para la fabricación de las probetas utilizando el proceso de FDM y una impresora 3D es necesario elaborar el código G, debido a que las probetas debían tener todas sus fibras de construcción en una sola orientación esto era muy difícil de conseguir con software de laminación convencionales como Cura, por lo cual se utilizó el software desarrollado por Andrew Gleadall profesor de la universidad de Loughborough al cual nombro como FullControl GCode Designer, este software a diferencia de los convencionales utilizados



para laminar un modelo en formato STL en los cuales consiste identificar el requerimiento, diseñar un modelo CAD, convertirlo en STL, laminarlo en un software de impresión 3D y obtener el código G para cargarlo a la maquina se salta todos estos pasos y pasa directo del requerimiento a elaborar el código G con el cual se le da a la maquina las órdenes para fabricar el modelo 3D.

### Figura 30

*Modelado de probeta utilizando FullControl GCode Designer*



*Nota.* Se muestra la trayectoria de impresión de las probetas que se diseño.

El código G para la fabricación de las probetas está elaborado para que la impresora las construya con las fibras en sentido paralelo o transversal como se observa en la figura 31, a continuación de establecen los parámetros con la que fueron programadas.

### Tabla 18

*Parámetros de impresión de las probetas*

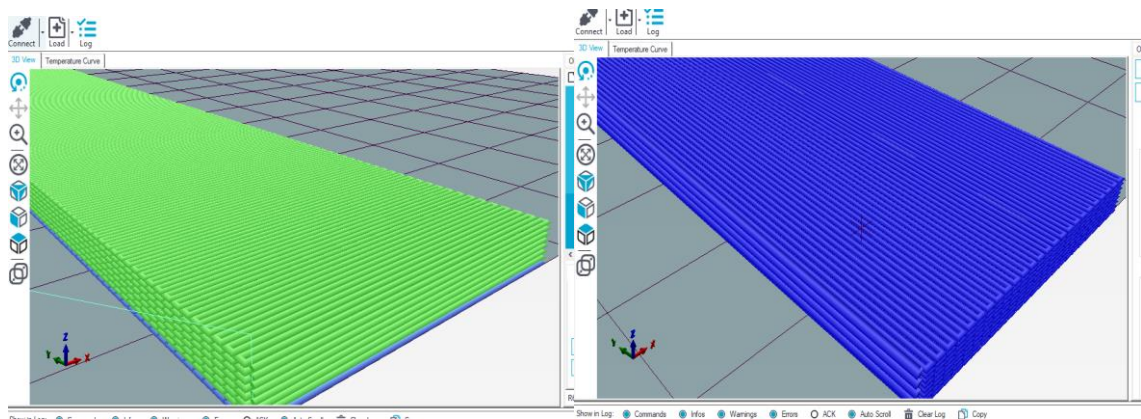
Parámetro	Valor
Ancho de línea	0.5 mm
Altura de capa	0.4 mm
Diámetro de la boquilla	0.8
Velocidad de impresión	2100 mm/s
Cantidad de capas	8

Temperatura de extrusión	240 °C
Temperatura de cama caliente	50 °C

*Nota.* Se muestra los parámetros configurados en la impresora para la impresión 3D de las probetas.

**Figura 31**

*Orientación de las fibras paralelas o transversales para la impresión de las probetas*

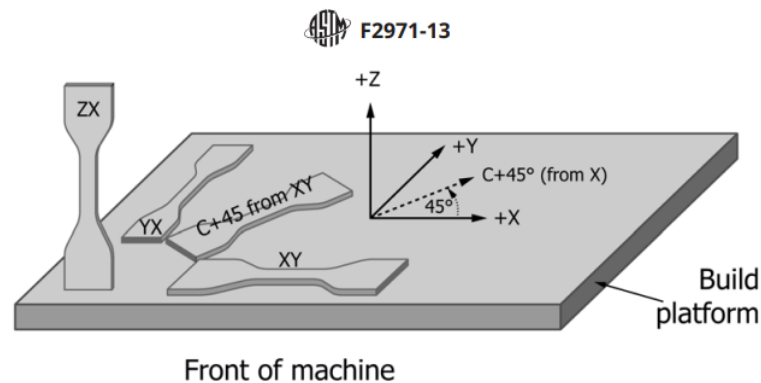


*Nota.* Diferencia en las orientaciones de las fibras de las probetas diseñadas.

Las probetas fueron impresas utilizando una impresora Kingroon Kp3s pro, y los ángulos de impresión de 0°, 45° y 90° en el plano X-Y de la cama de la impresora como lo especifica la norma ASTM F2971-13, no se realizaron probetas en el sentido ZX como lo muestra la figura 32, debido a la complejidad que presenta este nuevo material obtenido del reciclaje y procesamiento de tapas plásticas de polietileno y por la tendencia a deformarse por el enfriamiento de esta.

**Figura 32**

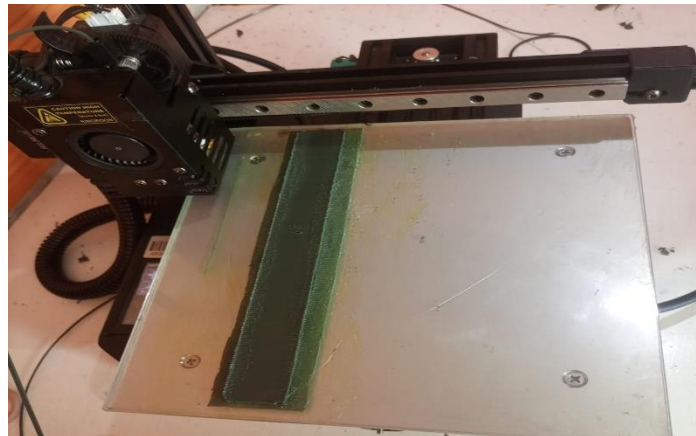
*Sentido de impresión de las probetas*



*Nota.* Diferentes sentidos de impresión de las probetas según la norma. Obtenido de: ASTM F2971-13

**Figura 33**

*Impresión 3D de las probetas para ensayos de tensión*



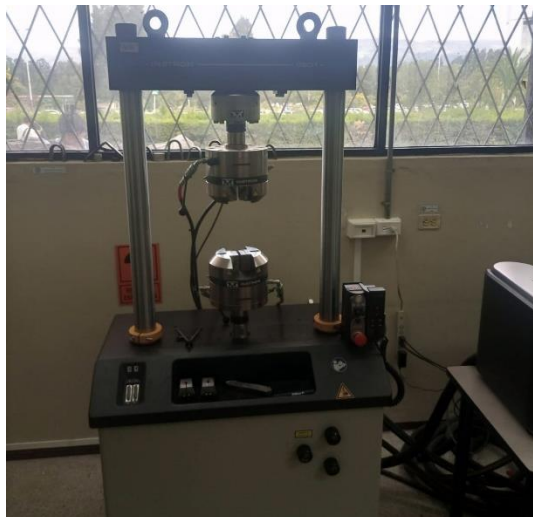
*Nota.* Proceso de impresión de las probetas que serán sometidas a ensayos de tensión.

Los ensayos de tensión de las probetas fueron realizados en la máquina de ensayos universales INSTRON 8801 (figura 34) la cual se encuentra en el laboratorio de mecánica de materiales en la Universidad De Las Fuerzas Armadas “ESPE”, con la cual se obtuvo los valores de deformación que experimentaban las probetas al ser sometidas a una carga, los parámetros de la maquina fueron:

**Tabla 19***Parámetros de ensayo de tensión*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Velocidad	20mm/min
Distancia entre mordazas	100 mm
Longitud máxima de ensayo	60mm
Unidad de fuerza	N

*Nota.* Características de la maquina y parámetros configurados para el ensayo de tensión.

**Figura 34***Máquina de ensayos universales INSTRON 8801*

*Nota.* Maquina utilizada para los ensayos de tensión de las probetas impresas en 3D.

Se elaboraron un total de 18 probetas impresas con el filamento obtenido del reciclaje de tapas de polietileno, estas fueron 3 con las fibras en sentido paralelo y 3 en sentido transversal para los ángulos 0°, 45° y 90° respecto del eje X de la impresora para las cuales se obtuvo los esfuerzos de la tabla 20.

**Tabla 20***Valores obtenidos en el ensayo de tensión de las probetas*

Ángulo	Dirección de la fibra	N° probeta	Área transversal mm <sup>2</sup>	Carga N	Delta mm	Deformación unitaria mm/mm	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo promedio Mpa
90	Paralela	1	80,7	1400	48,0	0,480	17,4	15,6
		2	77,6	826	27,0	0,270	10,6	
		3	84,7	1582	55,0	0,550	18,7	
	Transversal	4	76,7	552	1,72	0,017	7,20	8,75
		5	82,2	698	2,09	0,021	8,49	
		6	74,4	785	3,09	0,031	10,6	
45	Paralela	7	69,7	1278	15,0	0,150	18,3	17,2
		8	79,1	1405	13,1	0,131	17,8	
		9	80,8	1249	8,5	0,085	15,5	
	Transversal	10	48,6	106,82	0,62	0,006	2,20	3,51
		11	84,4	357	1,12	0,011	4,23	
		12	86,0	353	1,46	0,015	4,11	
0	Paralela	13	81,9	1437	12,5	0,125	17,6	16,3
		14	81,0	1192	12,4	0,124	14,7	
		15	78,6	1301	13,2	0,132	16,6	
	Transversal	16	76,0	566	1,42	0,014	7,45	6,31
		17	76,2	635	1,52	0,015	8,34	
		18	75,7	237	1,98	0,020	3,13	

*Nota.* Resultados obtenidos de los ensayos de tracción de las probetas impresas en 3D.

En la figura 35, se observa que, durante el ensayo de tensión de las probetas con fibras en sentido paralelo, al fallar estas entran en la zona plástica sufriendo una deformación permanente debido a que se estira de manera uniforme.

### **Figura 35**

*Falla de probeta con fibras en sentido paralelo*

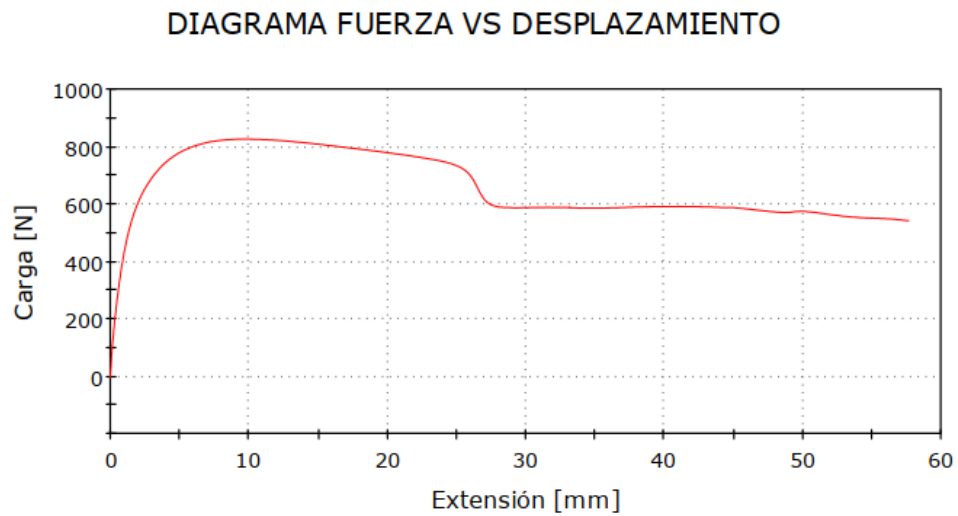


*Nota.* Muestra de cómo fallan las probetas con fibra paralela en el ensayo de tensión.

Las probetas que fueron impresas con sentido de las fibras paralelo a la longitud de estas presentan un comportamiento normal en los plásticos dúctiles en los cuales se puede observar que en cierta zona el material posee una zona elástica seguido de una zona plástica con una gran deformación como se observa en la figura 36.

**Figura 36**

*Diagrama esfuerzo deformación de la probeta N°2*

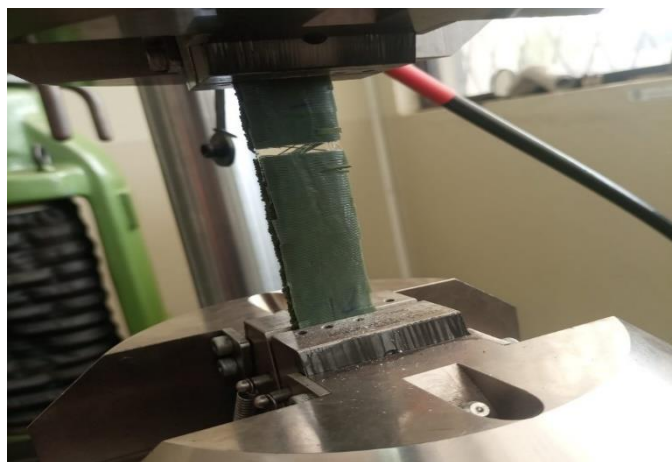


*Nota.* Se muestra la curva obtenida en el ensayo de tensión para la probeta 2.

Las probetas impresas con las fibras en sentido transversal fallan por delaminación como se observa en la figura 37, al despegarse las fibras unas de otras, produciendo una rotura de la probeta sin que las fibras lleguen a estirarse de forma plástica.

**Figura 37**

*Falla de probeta con fibras en sentido transversal*

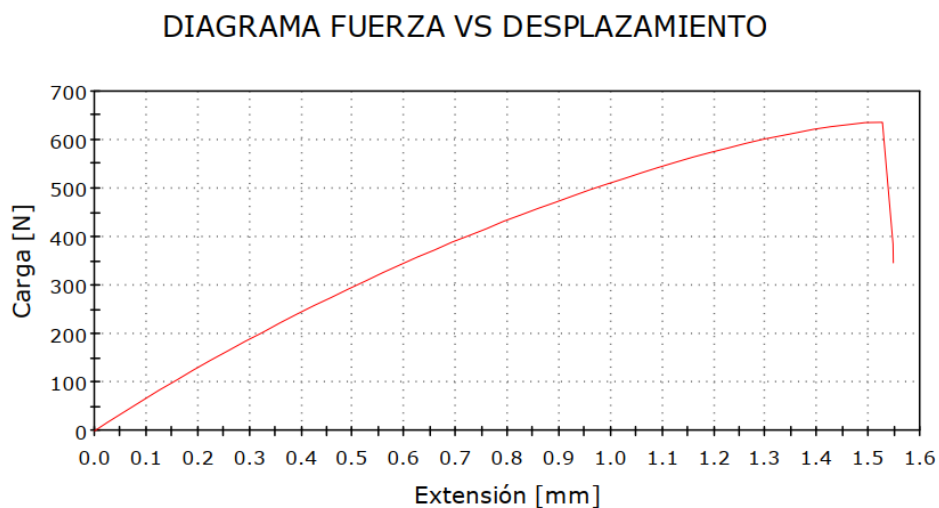


*Nota.* Probeta sometida a tensión con fibras perpendiculares y falla de esta.

En el diagrama de fuerza Vs desplazamiento de la figura 38 se observa como las probetas impresas con las fibras en este sentido, tienen un comportamiento como si se tratara de un material frágil, teniendo una deformación proporcional a la carga aplicada, además de no presentar zona plástica, sino que se produce una rotura con cargas y deformaciones muy bajas comparada a las probetas impresas con sentido de la fibra en la dirección paralela.

**Figura 38**

*Diagrama fuerza vs desplazamiento, probeta N° 17*



*Nota.* Curva fuerza deformación obtenida para la probeta 17, falla de esta.

Para la obtención de las propiedades mecánicas del filamento se usó la máquina de tracción horizontal mostrada en la figura 39, la cual cuenta con una longitud mayor de ensayo que la Instron 8801, con lo cual se podrá obtener la gráfica completa del esfuerzo Vs deformación del material hasta que esté sufra una rotura completa.



**Figura 39***Máquina de tracción horizontal*

*Nota.* Máquina utilizada para realizar en ensayo de tensión en las muestras de filamento.

En la tabla 21 se muestran las dimensiones de las muestras y otros parámetros del ensayo de tensión del filamento.

**Tabla 21***Muestras de filamento ensayado*

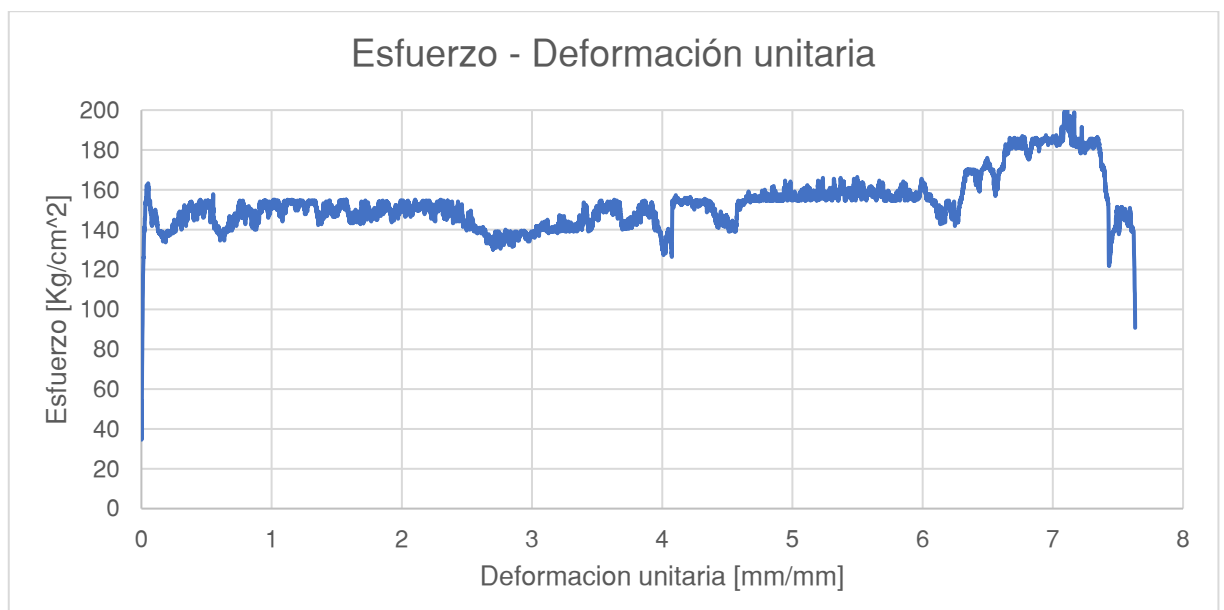
<b>Ensayo de tensión en muestras de filamento</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Diámetro 1</b>	<b>Diámetro 2</b>	<b>Diámetro 3</b>	<b>Diámetro promedio</b>	<b>Área transversal</b>	<b>Longitud entre mordazas</b>
	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm<sup>2</sup></b>	<b>mm</b>
1	1,95	1,99	1,95	1,963	3,027	100
2	1,78	1,96	1,97	1,903	2,845	100
3	2,3	2,4	2,29	2,330	4,264	100

*Nota.* Características dimensionales de las muestras de filamentos a ensayar.

En la gráfica de la figura 40 se observa la curva de esfuerzo deformación obtenida para la primera muestra de filamento, en la cual se observa cómo después de que experimenta una deformación lineal sufre una gran deformación cuando el material entra en fluencia, el cual es un comportamiento propio de los plásticos no rígidos.

**Figura 40**

*Diagrama esfuerzo deformación del filamento 1*

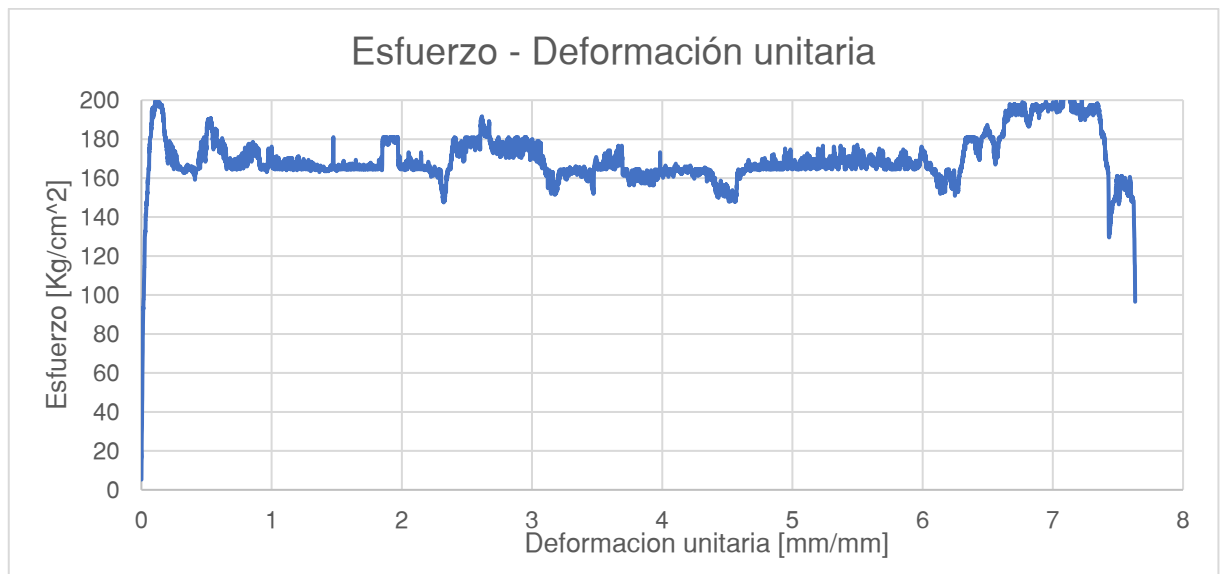


*Nota.* Se muestra la curva esfuerzo deformación obtenida para el filamento 1.

Esfuerzo de fluencia al 0.2%	141 Kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo máximo	200,719 Kg/cm <sup>2</sup>
Deformación unitaria	7,632 mm/mm
Esfuerzo ultimo	90,73 Kg/ cm <sup>2</sup>

**Figura 41**

Diagrama esfuerzo deformación del filamento 2



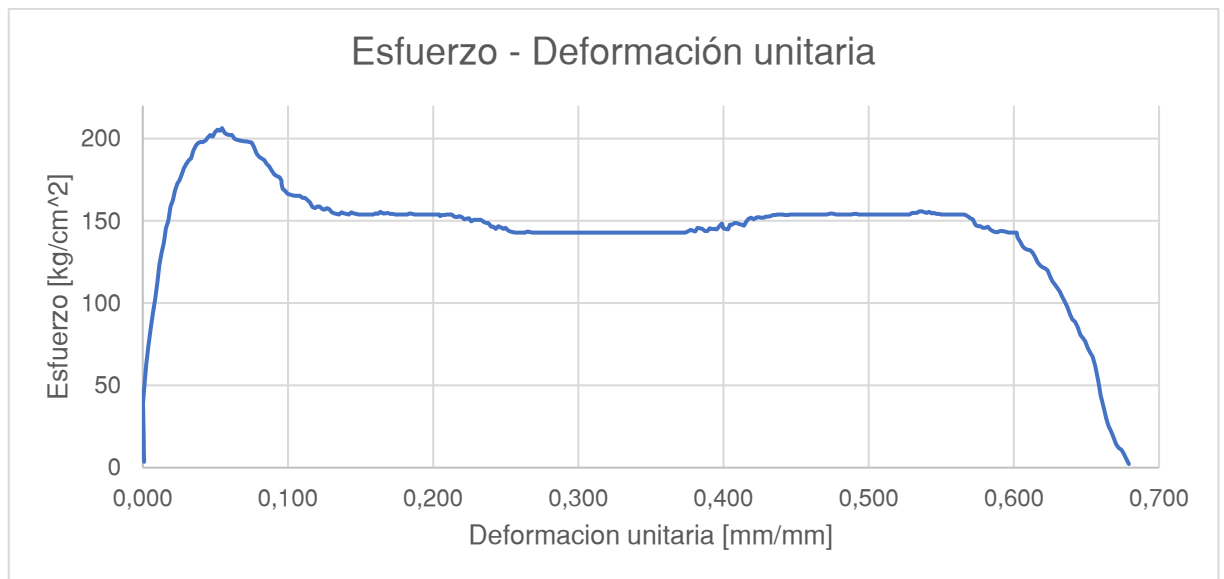
Nota. Se muestra la curva esfuerzo deformación obtenida para el filamento 2.

Esfuerzo de fluencia al 0.2%	120 Kg/ cm <sup>2</sup>
Esfuerzo máximo	213,57 Kg/ cm <sup>2</sup>
Deformación unitaria	7,632 mm/mm
Esfuerzo ultimo	96,54 Kg/ cm <sup>2</sup>

La muestra de filamento 3 era la que mayor diámetro tenía, y esta al ser sometida al ensayo de tensión presento una curva de esfuerzo deformación más suave que las anteriores muestras de filamento, pero sufrió una rotura con tan solo una deformación unitaria de 0.697 mm/mm siendo está muy baja en comparación a la anteriores que se estiraban hasta 7 veces su longitud inicial.

**Figura 42**

Diagrama esfuerzo deformación filamento 3



Nota. Se muestra la curva esfuerzo deformación obtenida para el filamento 3.

Esfuerzo de fluencia al 0.2%	187 Kg/ $\text{cm}^2$
Esfuerzo máximo	206,35 Kg/ $\text{cm}^2$
Deformación unitaria	0,697 mm/mm

En la tabla 22 se muestran los valores de las propiedades mecánicas obtenidas de las tres muestras de filamento transformados en MPa

**Tabla 22**

*Resumen de propiedades mecánicas del filamento y promedios de muestras*

<b>N° Muestra</b>	<b>Esfuerzo de fluencia MPa</b>	<b>Esfuerzo máximo MPa</b>	<b>Esfuerzo ultimo MPa</b>	<b>Deformación unitaria mm/mm</b>
Filamento 1	13,8	19,7	8,9	7,632
Filamento 2	11,8	20,9	9,5	7,632
Filamento 3	18,3	20,2	-	0,679
Promedio	<b>14,6</b>	<b>20,3</b>	<b>9,2</b>	<b>5,3</b>
Desviación estándar	3,36	0,59	0,40	4,01

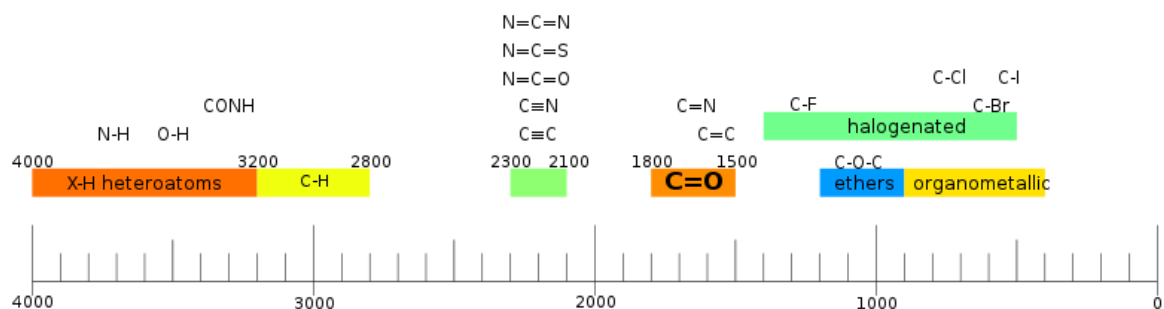
*Nota.* Se muestran los valores de esfuerzo calculados para las muestras de filamento y sus promedios.

### **Ensayo FTIR**

La espectroscopia por transformada de Fourier infrarroja consiste en aplicar a una muestra radiación infrarroja la cual al atravesarla parte de ella es absorbida, la radiación que logra atravesar la muestra es analizada en el detector y muestra el espectrómetro la cual es la huella digital molecular del material, un ensayo FTIR es útil para analizar, el haz de luz que incide sobre la muestra produce que los átomos de las moléculas vibren, estas vibraciones son específicas a ciertas frecuencias de los enlaces químicos y corresponden a niveles de energía de la molécula (figura 43), la cantidad de luz que absorbe la muestra se registra entre un rango de longitud de onda de  $4000\text{ cm}^{-1}$  y  $400\text{ cm}^{-1}$ . (Velandia Javier, 2017)

**Figura 43**

*Enlaces químicos y longitud de onda*

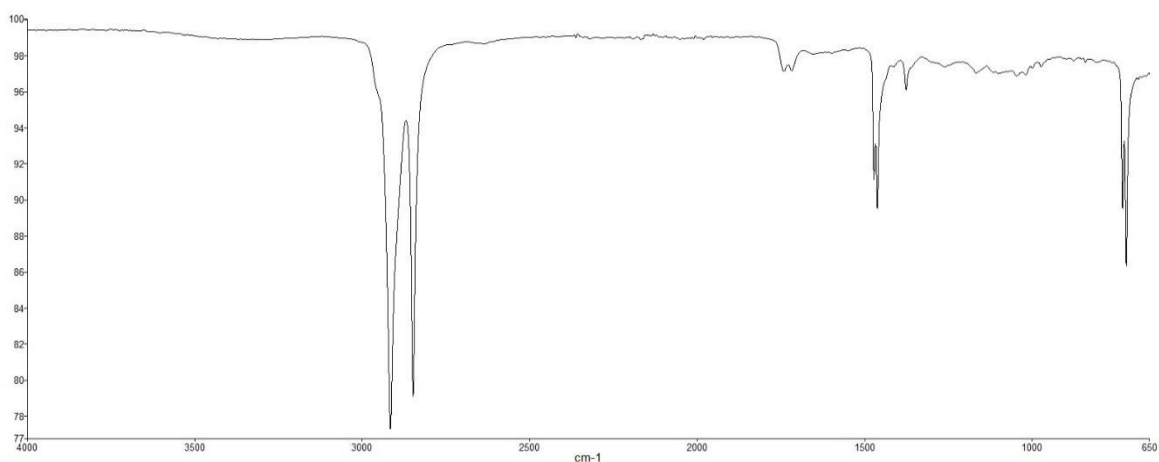


*Nota.* Se muestra los enlaces moleculares y su longitud de onda correspondiente. Obtenido de: Wikipedia

Al realizar el ensayo FTIR a las muestras del material reciclado sin procesar y el filamento obtenido después de fundir y extruir el material, se comparó el espectro obtenido con una base de datos y se encontró que el espectro en ambos casos se asemeja más al estándar del polietileno de baja densidad (PELD) mostrado en la figura 44, por el porcentaje de transmitancia y la longitud de onda que presentan los picos del espectro.

**Figura 44**

*FTIR estándar del PELD*



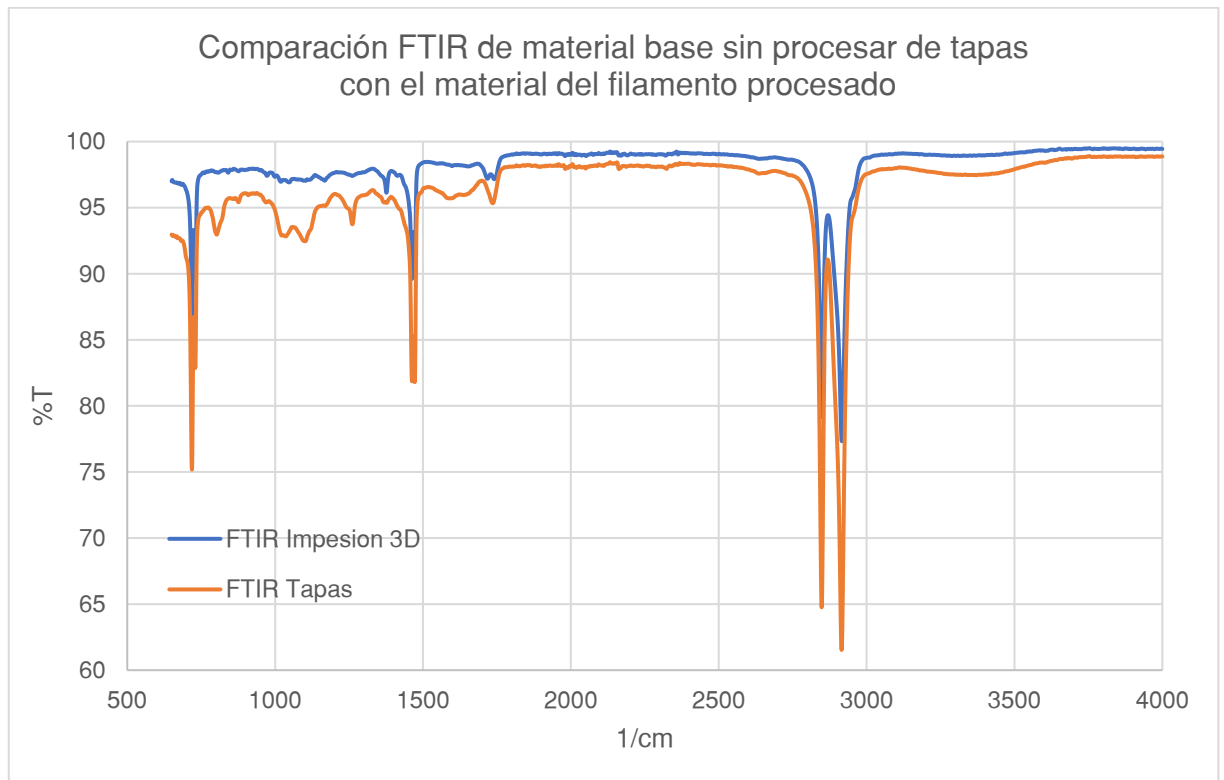
*Nota.* Espectrómetro obtenido des estándar de polietileno de baja densidad.

Las moléculas de polietileno de baja densidad pueden ser representadas de las siguientes formas, los enlaces a buscar en el espectrómetro de las muestras analizadas son C-H, C-C y -CH<sub>2</sub>.



**Figura 45**

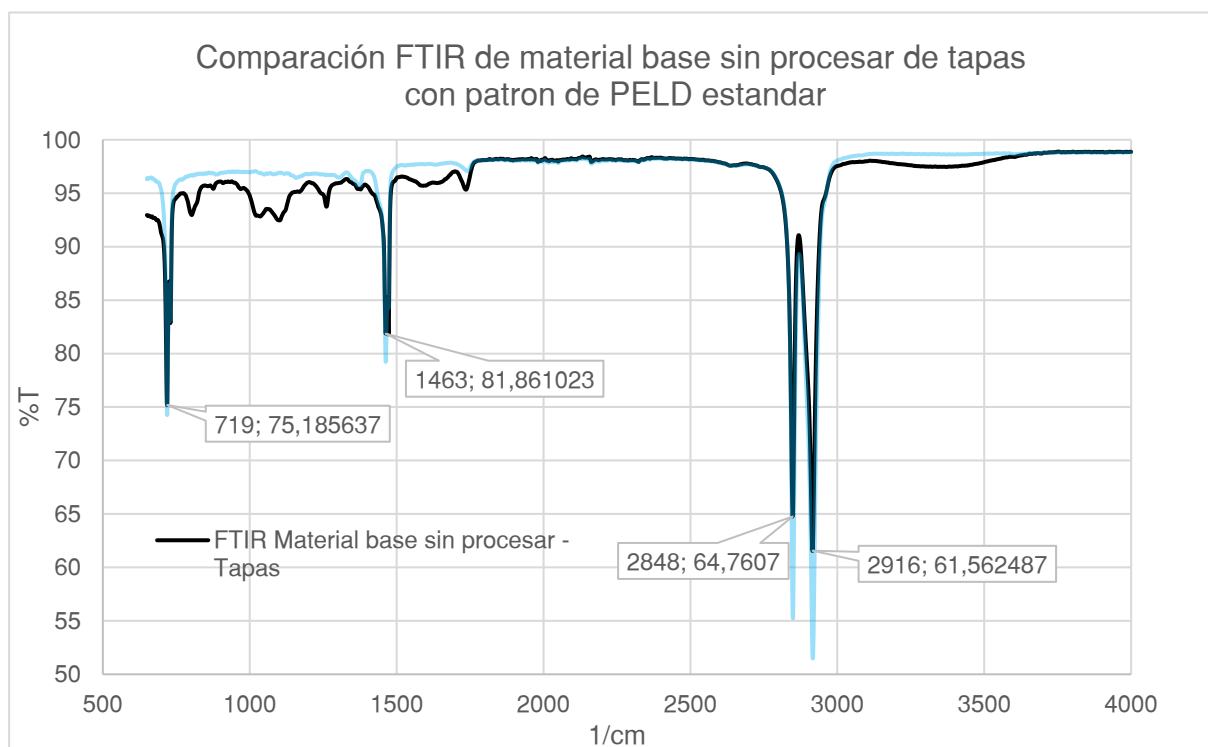
*Comparación de espectrómetro del material antes y después de procesarlo*



*Nota.* Se comparan los espectrómetros obtenidos del material base de tapas y la muestra de filamento.

Figura 46

*Espectrómetro del material base y el patrón estándar de polietileno*



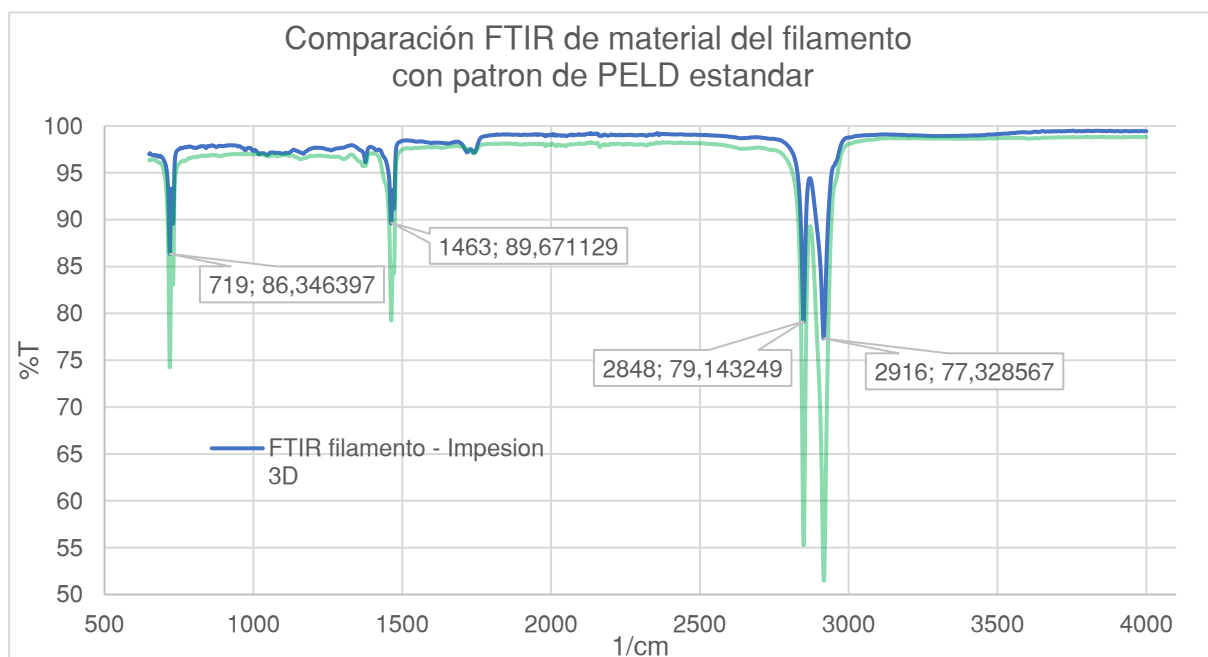
*Nota.* Se comparan los espectrómetros obtenidos del estándar y la muestra de material base de tapas.

En la figura 46 se observan los espectros obtenidos de la muestra de material base para la elaboración del filamento y el espectro estándar el polietileno de baja densidad y se identifican tres bandas que corresponden a los movimientos de tensión de los enlaces C-H a 2848  $\text{cm}^{-1}$  con una transmitancia del 64.76%, C-C 1463  $\text{cm}^{-1}$  y 81.86% de transmitancia, además de un movimiento de flexión de  $-\text{CH}_2$  en 719  $\text{cm}^{-1}$  con 75.18% de transmitancia.



**Figura 47**

*Espectrómetro del filamento y el estándar de PELD*



*Nota.* Comparación de del espectrómetro del estándar de polietileno con el del filamento.

Al observar los espectros de la figura 47 se puede identificar tres grupos de bandas los cuales corresponden a movimientos de tensión de los enlaces C-H a 2848  $\text{cm}^{-1}$  con una transmitancia del 79.14%, C-C 1463  $\text{cm}^{-1}$  y transmitancia del 89.67%, además de un movimiento de flexión de  $-\text{CH}_2$  en 719  $\text{cm}^{-1}$  y transmitancia del 86.34%

De los datos obtenidos del analizar el espectrómetro de las muestras del material de las tapas antes de ser procesado y después de procesarlo para producir filamento se concluye y comprueba que las respuestas obtenidas del espectrómetro son similares a las del espectrómetro del polietileno de baja densidad estándar, con la diferencia que las bandas de respuesta del patrón estándar son más fuertes que las del material procesado.

## Densidad

La densidad es el cociente entre la cantidad de masa de un determinado material y su volumen real de acuerdo a su forma.

Para la caracterización de la densidad del material se tomó 3 probetas rectangulares como se muestra en la figura 48, se realizó la medición de la masa con la ayuda de una balanza Shimadzu TW423L la cual posee una apreciación de 0.001g, el volumen se calculó al medir la diferencia entre el volumen del aceite sin sumergir la probeta y cuando está a sido sumergida.

**Figura 48**

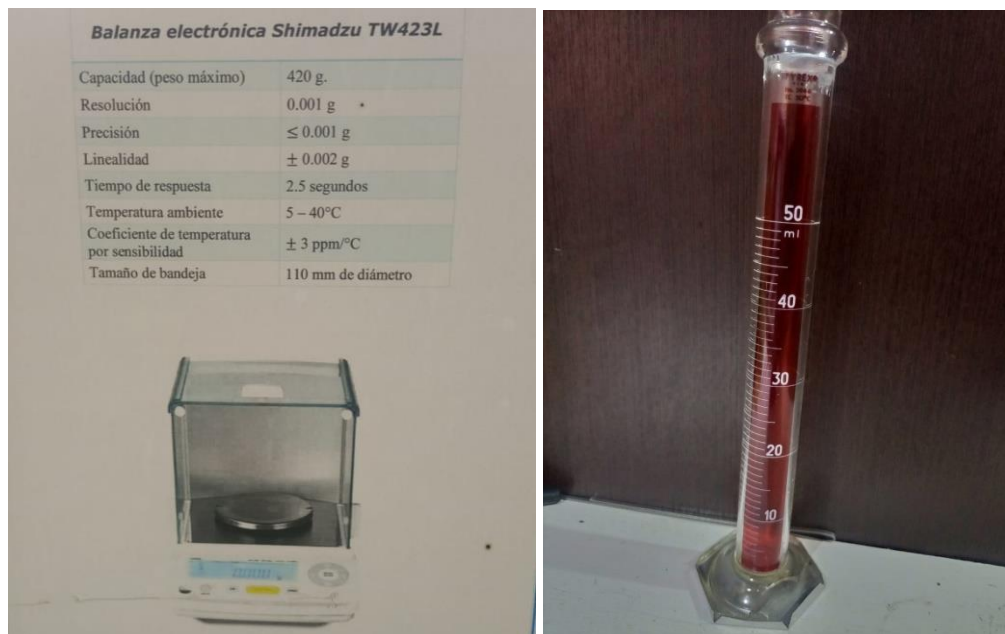
*Probetas para cálculo de densidad*



*Nota.* Muestras de probetas recortadas para calcular la densidad del material.

**Figura 49**

*Balanza usada para medir masa de probetas, tubo con escala graduada de volumen*



*Nota.* Instrumentos utilizados durante la toma de datos de masa y volumen de las probetas para determinar su densidad.

Se realizó la medición de tres valores de masa para cada probeta utilizando la balanza y 3 valores del volumen igualmente para cada una con lo cual al obtener un valor de densidad para cada uno se determinará una densidad promedio entre los valores de todas las mediciones, estos datos están tabulados en la tabla 23.

**Tabla 23***Densidad de las probetas*

<b>Probeta</b>	<b>Masa [g]</b>	<b>Volumen [cc]</b>	<b>Densidad [g/cc]</b>
	1,702	1,81	0,9400
1	1,703	2,01	0,8480
	1,702	1,91	0,8928
	1,386	1,47	0,9411
2	1,386	1,64	0,8426
	1,386	1,64	0,8459
	2,143	2,40	0,8916
3	2,143	2,47	0,8686
	2,145	2,41	0,8901
		Promedio	0,8845

*Nota.* Densidad calculada del material reciclado y procesado para obtener el filamento para impresora 3D

$$\rho = 0.8845 \frac{g}{cc}$$

### **Análisis de Resultados**

#### **Determinación de parámetros adecuados para obtener el filamento**

En el presente trabajo se buscó cuáles son los parámetros de temperatura de la extrusora así como la velocidad adecuada a la que gira el tornillo sin fin la cual está dada por la frecuencia configurada en el variador de frecuencia del tablero de control para obtener un filamento que no presente defectos y que además posea un diámetro con determinadas

tolerancias según las especificaciones. El modelo usado es uno multifactorial de dos factores con tres niveles y se lo aplicara con la ayuda de la herramienta Minitab para realizar el análisis estadístico de los datos.

Las variables que se determinaron tienen influencia al momento de producir el filamento y las que se analizaron con el DOE son la frecuencia del variador y la temperatura censada por la termocupla del control de temperatura, a continuación, se presenta la tabla generada en Minitab con las diferentes combinaciones de datos y los resultados obtenidos de configurar esos factores para producir el filamento (tabla 25).

En la tabla 24 se elaboró una escala del 1 al 6 con la cual se califica la calidad del filamento extruido según los defectos o características superficiales observadas en pruebas siendo la calidad 6 la ideal para que el filamento sea adecuado para una impresora 3D.

**Tabla 24**

*Escala de calidad del filamento extruido*

<b>Características o defectos presentados</b>	<b>Calidad asignada</b>
Piel de tiburón en exceso, discontinuidad, diámetro muy variable	1
Presenta poca piel de tiburón en la superficie, filamento discontinuo, diámetro variable.	2
Diámetro variable, superficie no uniforme	3
Filamento con superficie rugosa	4
Partículas sin fundir, cuellos, filamento liso	5
Filamento liso, diámetro constante	6

*Nota.* Características y defectos que presenta el filamento obtenidas de las pruebas y obtención de muestras.

**Tabla 25***Combinación de parámetros para tomas de datos*

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Temperatura	Frecuencia	Calidad	Recolección	Diámetro
				°C	Hz	1-6	1-10	mm
1	1	1	1	140	4	3	7	3,5
2	2	1	1	140	7	4	7	3,4
3	3	1	1	140	10	4	7	3,2
4	4	1	1	170	4	6	8	2,3
5	5	1	1	170	7	5	9	2,4
6	6	1	1	170	10	5	8	2,8
7	7	1	1	200	4	5,5	8	2
8	8	1	1	200	7	6	6	2
9	9	1	1	200	10	6	5	2

*Nota.* Combinación de parámetros y resultados obtenidos de aplicar el DOE.**Tabla 26***Análisis de varianza del DOE***Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	3,05556	0,38194	*	*
Lineal	4	2,87778	0,71944	*	*
Temperatura	2	2,86889	1,43444	*	*
Frecuencia	2	0,00889	0,00444	*	*
Interacciones de 2 términos	4	0,17778	0,04444	*	*
Temperatura*Frecuencia	4	0,17778	0,04444	*	*

Error	0	*	*
Total	8	3,05556	

*Nota.* Valores calculados de la varianza de los parámetros utilizados para producir el filamento.

### Ecuación de regresión

$$\begin{aligned}
 \text{Diámetro} = & 2,622 + 0,7444 \text{ Temperatura}_{140} - 0,1222 \text{ Temperatura}_{170} - \\
 & 0,6222 \text{ Temperatura}_{200} \\
 & - 0,02222 \text{ Frecuencia}_4 - 0,02222 \text{ Frecuencia}_7 \\
 & + 0,04444 \text{ Frecuencia}_{10} \\
 & + 0,1556 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{140} 4 \\
 & + 0,05556 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{140} 7 \\
 & - 0,2111 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{140} 10 - \\
 & 0,1778 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{170} 4 \\
 & - 0,07778 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{170} 7 \\
 & + 0,2556 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{170} 10 \\
 & + 0,02222 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{200} 4 \\
 & + 0,02222 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{200} 7 \\
 & - 0,04444 \text{ Temperatura} * \text{Frecuencia}_{200} 10
 \end{aligned}$$

### **Optimización de parámetros usando Minitab**

De los cálculos realizados de las regresiones se procede a optimizar con la ayuda de Minitab en busca de los parámetros de frecuencia y temperatura a configurar en la extrusora para la obtención de un filamento más adecuado tanto en el diámetro como en la calidad de este para evitar que presente defectos como partículas no fundidas, piel de tiburón o superficie rugosa.

**Tabla 27**

*Parámetros a optimizar con el DOE especificando un objetivo y rango de este*

<b>Respuesta</b>	<b>Meta</b>	<b>Inferior</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Superior</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Importancia</b>
Diámetro	Objetivo	1,8	2	2,4	1	1

*Nota.* Rangos de diámetro a buscar para optimizar parámetros.

**Tabla 28**

*Solución de la optimización realizada*

<b>Solución</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Diámetro Ajuste</b>	<b>Deseabilidad compuesta</b>
1	200	4	2	1

*Nota.* Resultados obtenidos al optimizar los parámetros a configurar en la extrusora.

Como lo muestra en la tabla 28 los parámetros más adecuados son configurar una frecuencia de 4Hz y una temperatura de la extrusora censada por la termocupla de 200°C



## Conclusiones y Recomendaciones

La extrusión de filamento y la calidad de este varía en función de los parámetros configurados en el equipo de los cuales son la temperatura y la frecuencia del variador, con una temperatura entre 180°C y 200°C es lo adecuado para la producción de filamento y de igual forma la frecuencia del variador debe estar entre un rango de 4 y 7 Hz, con estos parámetros se puede obtener un filamento con un diámetro mayor a 1.75mm pero con un acabado liso y sin presencia de partículas sin fundir que pueden ocasionar cuellos al momento de extruir el filamento o taponamiento del extrusor de la impresora.

Con el ensayo FTIR se pudo obtener el espectrómetro del material y compararlo con otros de materiales estándar se determinó que el polímero al que corresponden las tapas de botella usadas para la fabricación del filamento es el polietileno de baja densidad (PELD), el espectrómetro del material base de las tapas y el del filamento son muy similares por lo cual los componentes químicos de las dos muestras siguen siendo los mismos, pero con diferente transmitancia, esto puede ser causa de que la concentración o distribución de estos componentes cambiaron debido a que al fundir el plástico se degrada en cierta cantidad

El material obtenido presenta un esfuerzo de fluencia promedio de 14,6 MPa y un esfuerzo máximo promedio de 20,3 MPa, además de poseer una deformación unitaria mm/mm de 7.632 por lo cual es un material que aún conserva buenas propiedades mecánicas y no se ha degradado demasiado en el proceso de reciclaje y extrusión, la densidad obtenida de este material fue de 0.8845 g/cc por lo cual es un material bastante ligero.

Los modelos impresos con este material requieren de un adhesivo que fije el elemento a la cama de impresión mientras se está construyendo, el adhesivo usado para la

fabricación de probetas y modelos 3D fue cemento de contacto, debido a que el material es muy susceptible al warping y este se despega de la cama de impresión, pero es posible obtener modelos simples con buena calidad de acabado y sin sufrir efectos de delaminación.

De todas las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se concluye que si es posible obtener un filamento a partir de plástico reciclado el cual es adecuado para ser usado en impresoras 3D convencionales y es capaz de producir modelos 3D sin defectos de delaminación y con buen acabado superficial.

Para futuras investigaciones con otros materiales o adición de algún componente al filamento para mejorar sus propiedades, se recomienda mejorar los mecanismos de la extrusora para que esta permita producir una mayor cantidad de filamento en menor tiempo y pueda trabajar a mayores presiones.

### Bibliografía.

- Askeland, D. R. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (4ta ed., Issue TA403. A8318 2004.).
- Beltrán M. (2023). *TIPOS DE PLASTICOS, ADITIVACIÓN Y MEZCLADO*.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/16369158.pdf>
- Beltrán M, & Marcilla A. (2023). *Tecnología de Polímeros*.  
[https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA\\_4\\_extrusion.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf)
- Berchon M, & Luyt B. (2014). *La impresión 3D, Guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesional*.  
[https://editorialgg.com/media/catalog/product/9/7/9788425228544\\_inside.pdf](https://editorialgg.com/media/catalog/product/9/7/9788425228544_inside.pdf)
- Boude Oscar. (2017). *Impresión 3D al servicio de la academia*.  
<https://www.unisabana.edu.co/portaldenoticias/al-dia/impresion-3d-al-servicio-de-la-academia/>
- Campos D, & Caraway E. (2021). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA EXTRUSORA PARA FUNDIR PLÁSTICO PET RECICLABLE CON CAPACIDAD DE 5KG/H* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA].  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20768/4/UPS%20-%20TTS475.pdf>
- Carabajal, T., Prado, G., Ruiz, G., & Zonco, S. (2018). *Reciclaje de plásticos*.  
<https://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qaplicada/reciclado.pdf>
- E3D+VET. (2017). *GUIA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D*. <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-ES-RES.pdf>
- Fernández Sheila. (2020). *DISEÑO DE EXPERIMENTOS: DISEÑO FACTORIAL*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Han, Z., Yan, Y., Pang, X., Wang, B., & Sun, D. (2023). A new strategy to achieve the recycling of plastic waste by catalysis under mild conditions. *Separation and Purification Technology*, 323, 124505. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124505>

Meré Javier. (2009). *ESTUDIO DEL PROCESADO DE UN POLÍMERO TERMOPLÁSTICO BASADO EN ALMIDÓN DE PATATA AMIGABLE CON EL MEDIO AMBIENTE*. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID .

Opazo María. (2020). *¿Sabes cómo clasificar tus plásticos?*  
<https://www.diariosostenible.cl/noticia/el-dato-sostenible/2020/09/sabes-como-clasificar-tus-plasticos>

Palacios María. (2017). *Diseño y puesta en marcha de nuevos filamentos cargados para su uso en impresión 3D* [Universitat Politècnica De Valencia].  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/95313/PALACIOS%20-%20Dise%C3%B1o%20y%20puesta%20en%20marcha%20de%20nuevos%20filamentos%20cargados%20para%20su%20uso%20en%20impresion%203D.pdf>

Prendho UTPL. (2018). *Emprendimiento Lojano Imprime En 3D Con Material Reciclado*.

Roberto Adeva. (2023). *Todo lo que debes saber sobre la impresión 3D y sus utilidades*.  
<https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/impresion-3d/>

Rubiano J, Pérez Marco, Barrera Osvaldo, Orozco Wilman, Quesada Franz, Diaz Miguel Ángel, & Gaviria Luis Antonio. (2011). *Manejo de los materiales plásticos reciclados y mejoramiento de sus propiedades*. <https://core.ac.uk/download/pdf/236383521.pdf>

Shackelford, J. F. (2016). *Introduction to materials science for engineers*. Pearson Upper Saddle River.

Smith W., & Hashemi J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales* (The McGraw-Hil, Ed.; 4th Ed).

Velandia Javier. (2017). *Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja*.  
<https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>

Villegas Edmundo. (2019). *PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA Y REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO PARA SU USO EN FILAMENTO DE IMPRESIÓN 3D* [Universidad Técnica De Ambato].

<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/33187/1/Maestria%20M.M.%2014%20-%20Villegas%20Su%C3%A1rez%20Edmundo%20Sebasti%C3%A1n.pdf>

## **Apéndices**