Puesta en marcha y validación de parámetros de una extrusora, para la fabricación de filamentos de impresión 3D a partir de pellets de PLA.

Cristhian Camilo Vanegas Castro

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química
Programa académico de Ingeniería Química
Santiago de Cali, 2024

Puesta en marcha y validación de parámetros de una extrusora, para la fabricación de filamentos de impresión 3D a partir de pellets de PLA.

Cristhian Camilo Vanegas Castro

Trabajo de grado

Director: Ing. Rubén Camargo Amado, Ph.D.

Codirector: Ing. Santiago Sinisterra

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química
Programa académico de Ingeniería Química
Santiago de Cali, 2024

DEDIACTORIA

A mi familia, fuente de inspiración,
por su apoyo incansable y su comprensión,
en cada desvelo y en cada esfuerzo,
encontré su aliento, mi tesoro más precioso.

A mis amigos, faros en la tormenta,
risas compartidas, en cada prueba me alientan,
con su amistad sincera y su lealtad,
superamos juntos cualquier adversidad.

A mis profesores, sabios tutores,
quienes guiaron mis pasos con fervor,
con su sabiduría y enseñanzas valiosas,
despertaron en mí pasión y maravillas.

Y a mí mismo, por la constancia y valor,
por no rendirme ante el desafío y el temor,
este logro es fruto de mi persistencia,
un tributo a mi esfuerzo y a mi resistencia.

Que este trabajo sea un faro luminoso,
que inspire a otros a seguir su propio gozo,
y que el conocimiento aquí plasmado,
contribuya a un mundo mejor, iluminado.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su amor inquebrantable y su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera académica. Gracias por creer en mí, por alentarme en los momentos difíciles y celebrar mis logros con alegría.

A mis amigos, quienes han sido mi red de apoyo y mi motivación en todo momento. Gracias por comprender mis ausencias, por escucharme cuando necesitaba desahogarme y por compartir conmigo risas y momentos de distracción que me permitieron recargar energías.

A mis profesores y mentores, por su guía y conocimientos compartidos. Gracias por desafiarme a superar mis límites, por alentarme a explorar nuevas ideas y por brindarme su sabiduría, que ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, dedico este trabajo a mí mismo, por mi perseverancia, dedicación y esfuerzo constante.

TABLA DE CONTENIDO

0LISTA DE TABLAS 6
LISTA DE FIGURAS 7
RESUMEN 9
1. OBJETIVOS 10
1.2 OBJETIVO GENERAL 10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 10
2. INTRODUCCION 11
3. MARCO DE TEÓRICO 12
3.1 ANTECEDENTES 12
3.2 MARCO CONCEPTUAL 13
3.3 MARCO LEGAL 13
3.4 MARCO INSTITUCIONAL 14
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL 15
4.1 PRUEBAS PRELIMINARES 15
4.2 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO PROMEDIO 17
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 19
5.1 DIÁMETRO PROMEDIO 19
5.2 VALIDACION DEL FILAMENTO PRODUCIDO 22
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 30
6.1 CONCLUSIONES 30
6.2 RECOMENDACIONES 31
REFERENCIAS 32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño experimental para la determinación del diámetro del filamento. 18
Tabla 2. Datos obtenidos en el desarrollo del diseño experimental. 19
Tabla 3. Análisis de varianza obtenido en Minitab. 22
Tabla 4. Parámetros de impresión. 23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Wellzoom 2021 Extrusora de escritorio Línea II+. 15
Figura 2. Mecanismo interno una extrusora con dos zonas calefactadas 16
Figura 3. Montaje final de la extrusora. 16
Figura 4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados. 20
Figura 5. Graficas de distribución normal. 21
Figura 6. Proceso de producción de filamento**.** 22
Figura 7. Probeta para ensayo físicos. 23
Figura 8. Purga de la impresora. 24
Figura 9. Proceso de impresión. 24
Figura 10. Maquina Universal de ensayos. 25
Figura 11. Prueba de tensión. 26
Figura 12. Fallo de la probeta. 26
Figura 13. Zonas de estudio basados en pruebas de esfuerzo. (Solano, 2018) 27
Figura 14. Resultados prueba de tensión del filamento producido a partir de pellets de PLA. 28
Figura 15. Resultados prueba de tensión filamento comercial. 28

RESUMEN

En el presente trabajo, se llevó a cabo la implementación de una extrusora a escala de laboratorio en un espacio designado dentro del laboratorio de Fisicoquímica de Bio y Nanomateriales de la Universidad del Valle. Se realizaron pruebas preliminares con el objetivo de identificar los parámetros más significativos del proceso.

Entre estos parámetros, se investigó la distancia entre la boquilla de la extrusora y la zona de enfriamiento, mediante el uso de corrientes de aire perpendiculares al sistema. Además, se analizó la velocidad de extrusión, la cual está determinada por el movimiento del tornillo de la extrusora. Por último, se evaluó la temperatura de las zonas de alimentación y el cuerpo de la extrusora.

Durante el proceso de estudio se determinó que las temperaturas adecuado para la producción de un filamento apto para impresión 3D a partir de pellets de PLA el cual es de 170°C para la zona de la boquilla y de 180°C para la zona de alimentación. Se determino de igual forma que la distancia entre la boquilla y la zona de enfriamiento no es un factor que afecte directamente al proceso siempre y cuando los valores no sean muy altos.

La velocidad de extrusión del material es un parámetro que se puede fijar dependiendo las necesidades y el material, en el caso del PLA la velocidad optima de extrusión es de 40 Rpm, donde se logra producir 2.3 metros de filamento funcional por minuto.

Se realizaron impresiones con el filamento obtenido y se lograron obtener los diseños requeridos sin problema alguno, utilizando los parámetros por defecto para el PLA comercial.

A través del análisis llevado a cabo en la máquina universal de ensayos mediante pruebas de tensión, se concluyó que el material exhibe una resistencia satisfactoria, aunque no alcanza el nivel de resistencia del filamento comercial. Esta disparidad podría atribuirse a la ausencia de un tratamiento térmico posterior a la extrusión. Este hallazgo no solo proporciona información valiosa sobre las propiedades del material, sino que también plantea la posibilidad de futuras investigaciones y estudios relacionados.

Palabras clave: Extrusión, PLA, filamento, control de proceso, parámetros de extrusión.

1. OBJETIVOS

1.2 OBJETIVO GENERAL

Implementar el montaje, puesta en marcha de un equipo de extrusión a escala piloto y validación de parámetros para la producción de un filamento para impresión 3D a partir de pellets de PLA.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.3.1 Realizar el montaje y puesta en marcha de un equipo de extrusión.

1.3.2 Elaborar un manual de uso y operación de un equipo de extrusión.

1.3.2 Validar los parámetros (velocidad de extrusión, temperaturas de extrusión y distancia de la zona de enfriamiento) para la producción de un filamento funcional para impresión 3D, mediante la extrusión de pellets de PLA.

2. INTRODUCCION

En la era actual, la tecnología de impresión 3D ha experimentado un crecimiento exponencial debido a su capacidad para crear rápidamente una amplia variedad de prototipos y productos personalizados. Esta versatilidad ha generado una alta demanda de filamentos, que son indispensables para el proceso de extrusión en la impresión 3D. Por lo tanto, surge la necesidad de implementar sistemas de fabricación de estos filamentos para satisfacer dicha demanda.

En este trabajo de grado, se llevó a cabo la instalación, puesta en marcha y validación de los parámetros de desempeño de una extrusora "Modelo Wellzoom 2021 Extrusora de escritorio Línea II+, adquirida en la Universidad del Valle. El propósito principal de esta extrusora es producir filamentos para la impresión 3D utilizando pellets de ácido poliláctico (PLA). El objetivo es lograr filamentos con un diámetro promedio altamente consistente y con la menor desviación posible, utilizando el sistema propuesto. Todo esto se llevó a cabo con la intención de implementar el proceso a escala piloto.

La impresión 3D es una herramienta muy útil en la fabricación de piezas o montajes para diferentes usos, por ende, se ha generado una alta demanda de filamentos para su operación, que va aumentando aproximadamente un 15.5% anual, según estudios de mercado realizado por "Grand View Research" (Grand View Research, 2021), donde ha recopilado datos que también indican que los precios aumentarán 17.7% cada año, estas proyecciones están previstas hasta el 2028. Con base a lo mencionado anteriormente se decidió implementar una extrusora para la producción de los filamentos.

En el ámbito económico el principal protagonista es el filamento, el cual se puede producir o comprar, para algunas empresas se hace necesaria la producción de sus propios filamentos, por el uso frecuente, o el uso de materiales específicos. Existen materiales compuestos con formulación específica, por ende, es necesario el uso de un proceso de extrusión más personalizado. En este proyecto se implementó el uso de ácido poliláctico LX175 PLA, es un polímero biodegradable de origen renovable por lo que evitaríamos hacer uso de fuentes como el petróleo, se eligió inicialmente por la disponibilidad, además presenta grandes beneficios para producir materiales compuestos con propiedades especificas (Molina, 2023).

Este proyecto de grado cobra importancia tanto para los autores, como para otros estudiantes y futuros profesionales debido al aprendizaje, entrenamiento, el uso de materiales compuestos y el desarrollo de filamentos. La finalidad de este trabajo es tener el equipo probado y trabajando, así como el manual de uso y operación (Anexo 1), abre la posibilidad del desarrollo de nuevos filamentos de material compuesto para investigación y uso en impresión 3D de piezas con propiedades específicas, además del posible uso en la biomedicina, como lo serian implantes médicos con composiciones específicas para el tratamiento de enfermedades.

3. MARCO DE TEÓRICO

3.1 ANTECEDENTES

La impresión 3D ha marcado una nueva etapa en los desarrollo tecnológicos, debido a que facilita la impresión de objetos con geometrías más intrincadas, cambios y personalizaciones llegando a poder fabricar en un solo paso diseños complejos, se produce menor desperdicio de material (al prescindir de moldes y de algunos postprocesos sobre piezas) por lo que la innovación en producto se acelera y simplifica ofreciendo no solo ventajas en costes, sino también en barreras a la entrada, en las cadenas de suministro y en la participación del cliente en el diseño (Weller et al., 2015)

La extrusión de plástico ha sido un proceso desafiante para muchos fabricantes e investigadores para originar productos que cumplan con los requisitos al costo más bajo. Lo arduo del proceso de extrusión es la enorme cantidad de parámetros involucrados que hacen difícil mantener el proceso bajo control. La complejidad y manipulación de parámetros puede causar serios problemas de calidad y altos costos de fabricación.(Raju et al., 2014)

En los procesos de extrusión se ha generado un problema relacionado con la fragilidad del material al someterse a fuerzas de tracción, debido a ello (Torrado Perez et al., 2014) empleó plataformas precalentadas y envolventes de construcción con control de temperatura para disminuir la deformación de la pieza durante el proceso FDM. Se encontró que el acrilonitrilo butadieno estireno reforzado con 5% en peso de TiO_2 exhibió la máxima resistencia a la tracción máxima de hasta 154,6N. (Kuo et al., 2021).

La impresión 3D se ha implementado también en el campo de la construcción, además es uno de los principales factores que respaldan la creciente demanda de tecnología de impresión 3D en la región. Las empresas están aprovechando la experiencia de la impresión 3D de hormigón para construir una casa en uno o dos días. Por ejemplo, en 2018, Constructora Conconcreto construyó la primera casa impresa en 3D de Colombia llamada Casa Origami. En Uruguay, eSUN construyó una estatua de 2,3 metros de altura de la famosa estrella de fútbol Fernando Morena utilizando material PLA. Varios países como Chile, Venezuela y otros también están adoptando la impresión 3D para la construcción y la arquitectura. Como resultado, se espera que la creciente adopción de la fabricación aditiva impulse el crecimiento del mercado de servicios y software de impresión 3D en la región del resto de América del Sur.(BIS RESEARCH Inc., 2022)

Durante el proceso de extrusión se pueden generar filamentos con propiedades específicas, como por ejemplo la mezcla de PLA con almidón de achira la cual presenta una resistencia más alta a la tensión, y un aumento de elongación a la rotura, comparado con el PLA solamente. (Molina, 2023).

La capacidad de utilizar los filamentos producidos en el campo de la salud lo explica Daly A, en su artículo “Medical 3D Printing, Intellectual Property and Regulation” como la impresión 3D y la bioimpresión 3D avanzan constantemente como técnicas para fabricar,

productos médicos. Particularmente en dispositivos médicos, también explica cómo se comporta la ley en este campo, se aclara que no existe actualmente ninguna ley internacional vinculante sobre la regulación de dispositivos médicos. En la parte económica implica una mayor accesibilidad de las personas de escasos recursos de obtener algún tipo de prótesis que ayude a mejorar su condición de vida.(Daly, n.d.)

3.2 MARCO CONCEPTUAL

Ácido poliláctico (PLA)

El PLA, conocido como ácido poliláctico o polilactida, es un termoplástico derivado en su mayoría de materiales biodegradables como el almidón de maíz, las raíces de mandioca o la caña de azúcar, en comparación con otros materiales industriales, que son principalmente a base de petróleo. Respetuosa con el medio ambiente, esta sustancia ha ganado popularidad en la industria de la impresión 3D y se utiliza cada vez más para aplicaciones médicas y productos culinarios.(BIS RESEARCH Inc., 2022)

Extrusión

La extrusión es un proceso físico en el cual se utiliza la temperatura de fusión como agente principal, ya que gracias a ella se logra derretir un material, para posteriormente hacerlo pasar por una boquilla de diámetro fijo.

Filamento de impresión 3D

En la impresión 3D se utilizan unas impresoras cuyos mecanismos se basan en una pequeña extrusora la cual crea mediante planos previamente diseñados, figuras y otros objetos los cuales estarían compuestos por polímeros, donde estos son cargados a la impresora en forma de filamentos, los cuales tienen un diámetro determinado.

Biopolímeros

Un biopolímero es un tipo de polímero que se origina a partir de fuentes biológicas, como organismos vivos o biomasa renovable, en el caso del PLA es derivado de fuentes como el almidón de maíz, el PLA es un biopolímero ampliamente utilizado en la fabricación de plásticos biodegradables.

3.3 MARCO LEGAL

La impresión 3D forma parte ya de un nuevo capítulo de la revolución industrial. Y, como ha ocurrido tantas otras veces en la historia, la tecnología a menudo se mueve mucho más rápidamente que la ley. (Martí, 2017)

La venta libre de las impresoras 3D genera un margen legal muy complejo, ya que se hace difícil controlar que tipo de objetos pueden llegar a imprimir, en Colombia actualmente no existe ninguna limitación legal para comprar una impresora, ni para lo que se imprime con ella.

La impresión 3D y la bioimpresión 3D avanzan constantemente como técnicas para fabricar productos médicos. Particularmente en dispositivos médicos, la impresión 3D está comenzando a usarse más comúnmente para fabricar esos productos, como lo son equipos de protección personal y otros objetos como recambios para ventiladores. Por lo general, este tipo de impresoras 3D, especialmente las que pertenecen y son utilizadas por los fabricantes, utilizan materiales bastante simples, como los plásticos. Los entornos médicos y de salud, como los hospitales, pueden poseer impresoras 3D que utilizan metales para hacer prótesis. Los materiales aún más complejos y experimentales para la impresión 3D son compuestos para bioimpresión, que se encuentra en una etapa de investigación prometedora pero aún temprana debido a su complejidad inherente. (Daly, n.d.)

3.4 MARCO INSTITUCIONAL

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad del Valle, sede Meléndez, en la Escuela de Ingeniería Química en el laboratorio del grupo de investigación de Fisicoquímica de Bio y Nanomateriales. Este trabajo se realizó con fines académicos y de ampliar la posibilidad de generar nuevas investigaciones enfocadas en la caracterización de nuevos filamentos, no tiene ningún conflicto de interés, ni económico o personal que puedan intervenir en su desarrollo.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 PRUEBAS PRELIMINARES

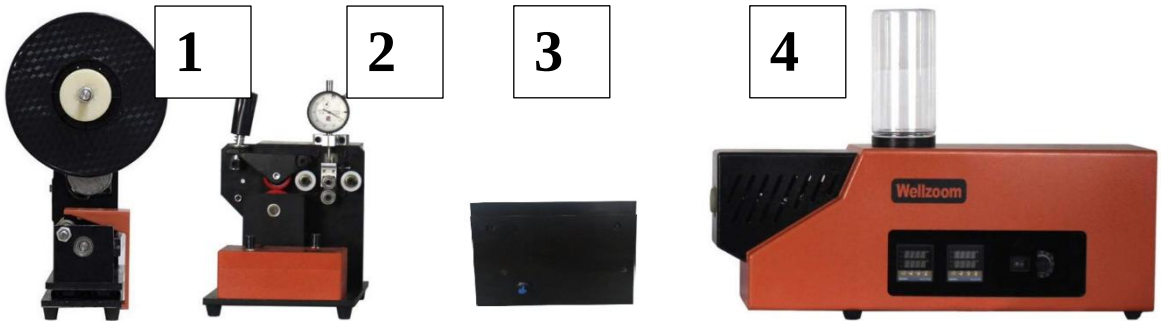

Figura 1. *Wellzoom 2021 Extrusora de escritorio Línea II+.*

El análisis del proceso empezó por la identificación de cada una de sus partes, en la Figura 1 se pueden observar los principales elementos de la extrusora "Wellzoom 2021 Extrusora de escritorio Línea II+"; el numero (1) es el rodillo de embobinado, el encargado de embobinar el filamento para poder realizar su uso posteriormente en una impresora, se debe mantener un equilibrio en la velocidad de embobinado con respecto a la velocidad de los rodillos de tensión(2) de lo contrario se acumula a la salida de los mismo y se enreda, dañando el proceso; segundo son los rodillos de tensión, son los encargados de mantener un flujo continuo de filamento, esta tensión va de la mano con la velocidad de extrusión, debido a que si se mantiene constante y la velocidad de extrusión aumenta, se va a generar una acumulación de filamento, generando daño del filamento; el tercer elemento es la zona de enfriamiento(3) la cual es la encargada en retirar calor del filamento luego de salir de la extrusora(4), con la finalidad de evitar que se deforme ya que en la salida de la boquilla el filamento se encuentra a temperaturas superiores a 113°C, esta temperatura está ligada directamente a las temperaturas con las cuales este operando la extrusora, en este caso a unas temperaturas de 156-166°C; finalmente el cuarto elemento y el más importante es la extrusora, la encarga del forzar el PLA a través de una boquilla utilizando presión y calor. Como se observa en la Figura 1, la extrusora cuenta con 2 zonas de calor (zona de alimentación y cuerpo) las cuales tienen control de temperatura independiente, tal como se ilustra en la Figura 2.

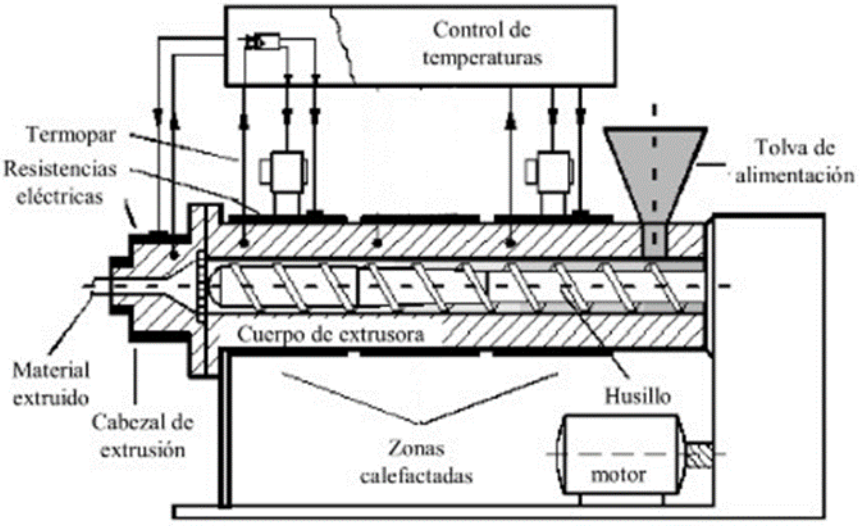

Figura 2. *Mecanismo interno una extrusora con dos zonas calefactadas*

En la Figura 3, se observa el montaje final de la extrusora usado en las pruebas preliminares en las cuales se buscó inicialmente observar cómo se da el proceso, identificando variables que se pueden controlar y de esa forma poder determinar cuáles son variables de control y cuales la de respuesta. Para ello se realizaron pruebas básicas, donde se identificaron las siguientes:

- Temperatura de la zona de extrusión (zona del alimentación y cuerpo de la extrusora).
- Velocidad de extrusión (velocidad del tornillo).
- Distancia a la zona de enfriamiento.
- Zona de enfriamiento (enfriamiento por flujo de agua o aire).
- Diámetro del filamento.

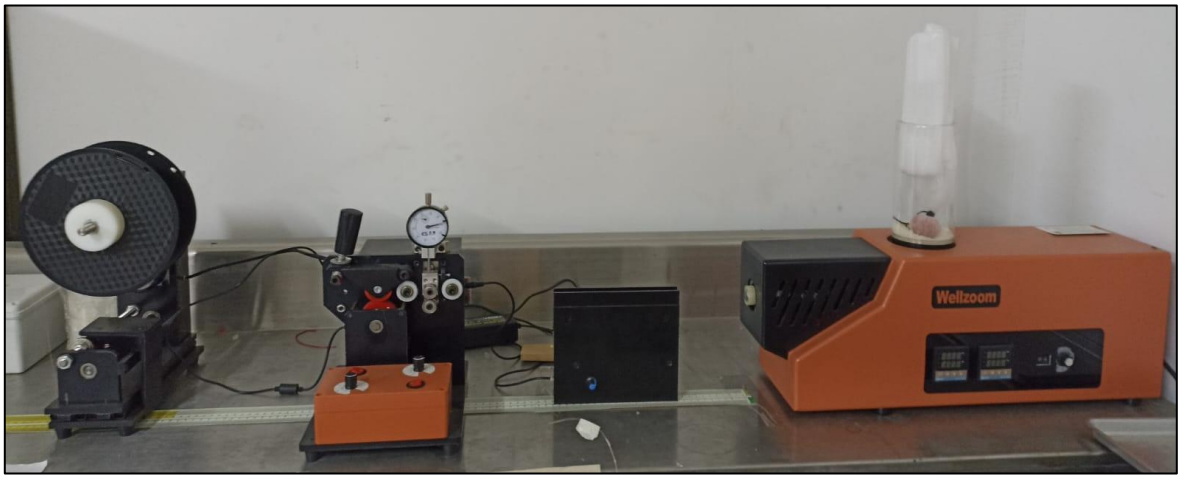

Figura 3. *Montaje final de la extrusora.*

El diámetro del filamento es una variable de respuesta, se realizaron pruebas para establecer los niveles para desarrollar el diseño experimental. El proceso de extrusión se basa en alcanzar la temperatura de fusión optima de un material determinado, en este caso el PLA es de 180°C.

Se realizaron análisis de dos factores clave para la zona de enfriamiento: el tipo de zona (aire o agua) y la distancia. La elección de la zona se determinó considerando que el enfriamiento por aire previene el aumento de la humedad en el material, lo cual podría ocasionar problemas de calidad durante la impresión. La presencia de humedad puede generar burbujas en el filamento, lo que agregaría pasos adicionales e innecesarios al proceso, como puede ser un tratamiento térmico de secado. Por lo tanto, se buscó optimizar el sistema y no agregar procesos extras.

Con la distancia entre la boquilla de la extrusora y la zona de enfriamiento se observó que, al ser mayor, el material se deformaba formando un arco lo cual genera que el diámetro del filamento disminuya, por lo tanto, se trabajó con distancias cortas de 4, 8 a 12 cm, para determinar la más adecuada para el diámetro requerido.

Como se observa en la Figura 2, la temperatura de la extrusora está dividida en dos secciones controlables por separado, en este caso se manejó en intervalos, en las pruebas se utilizó como punto de partida la temperatura optima de fusión de 180°C, cuando los valores bajaban de 165°C disminuía la salida del filamento, lo que indica que la maquina se ve forzada, ya que el material tendrá dificultad para salir, posteriormente cuando la temperatura pasaba de los 186°C, el filamento salía líquido, lo que provoca problemas en el proceso, ya que no se alcanza a estabilizar antes de la etapa de enfriamiento. Es debido a esto que los niveles para la temperatura serán (165-175, 170-180, 175-185) °C.

La velocidad de extrusión en este sistema se centra en la velocidad con la cual gira el eje (tornillo) la cual está dada en rpm, las pruebas preliminares se realizaron en una velocidad fija de 40 rpm, posteriormente los niveles se manejaron con una variación de ±10 Rpm.

4.2 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO PROMEDIO

El diámetro promedio que se buscó con esta investigación es de 1.75mm debido a que es el diámetro de operación de una gran parte de las impresoras 3D, por lo tanto, se evaluaron diferentes condiciones para tener un mínimo valor de variación a lo largo del filamento, para ello se realizaron pruebas variando 3 niveles de distancia, entre la boquilla de la extrusora y la zona de enfriamiento de 4, 8 y 12 cm, además de la velocidad de extrusión de 30, 40 y 50 rpm en el tornillo principal y por último la temperatura de las zonas de extrusión, donde se manejaron 3 niveles (165-175, 170-180, 175-185) °C, de esta forma finalmente se tomaron tres trozos de filamento de aproximadamente 50 cm y se le realizaron medidas cada 10 cm

para determinar la variación del diámetro; es así como se estableció el siguiente diseño experimental:

Parámetros:

-Tipo de enfriamiento (Por corriente de aire constante)

-Tipo de material (PLA)

-Equipo (Extrusora Modelo Wellzoom 2021 Extrusora de escritorio Línea II+)

Factores:

-Distancia a la zona de enfriamiento (4, 8, 12 cm)

-Velocidad de extrusión (30, 40, 50 Rpm)

-Temperaturas de las zonas de extrusión.

- Zona de alimentación (165, 170, 175) °C.
- Cuerpo de la extrusora (175, 180, 185) °C.

Variable de respuesta:

-Diámetro final del filamento.

Con estos factores se emplea un diseño factorial 3^3.

Tabla 1*. Diseño experimental para la determinación del diámetro del filamento.*

Nomenclatura	Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A	Distancia de enfriamiento (cm)	4	8	12
B	Velocidad de extrusión (rpm)	30	40	50
C	Temperaturas zonas de extrusión (°C)	165-175	170-180	175-185

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 DIÁMETRO PROMEDIO

Se llevaron a cabo las experimentaciones correspondientes, modificando los factores de acuerdo con el diseño experimental establecido, lo que permitió obtener el diámetro promedio. Para reducir el margen de error, se realizaron tres réplicas, tomando los datos a una temperatura ambiente de 24.4°C. Los intervalos de temperatura para las zonas de extrusión fueron 165-175, 170-180 y 175-185, considerándose como rangos baja, media y alta, respectivamente.

Tabla 2. *Datos obtenidos en el desarrollo del diseño experimental.*

Corrida	Temperaturas-Zonas de extrusión (°C)	Velocidad de extrusión (rpm)	Distancia de enfriamiento (cm)	Diámetro promedio		
				Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	baja	30	4	1.36	1.448	1.394
2	media	40	8	1.422	1.294	1.362
3	alta	50	12	1.486	1.556	1.524
4	media	30	4	1.67	1.606	1.46
5	alta	30	4	1.516	1.532	1.644
6	baja	40	4	1.568	1.566	1.51
7	media	40	4	1.766	1.732	1.752
8	alta	40	4	1.53	1.782	1.526
9	baja	50	4	1.578	1.72	1.636
10	media	50	4	1.588	1.488	1.482
11	alta	50	4	1.624	1.644	1.604
12	baja	30	8	1.52	1.518	1.57
13	alta	30	8	1.566	1.758	1.83
14	media	30	8	1.592	1.754	1.842
15	baja	40	8	1.826	1.326	1.248
16	alta	40	8	1.336	1.67	1.58
17	baja	50	8	1.758	1.674	1.61
18	media	50	8	1.688	1.718	1.595
19	alta	50	8	1.14	1.12	1.206
20	baja	30	12	1.276	1.184	1.154
21	media	30	12	1.15	1.142	1.162

Teniendo en cuanta los datos obtenidos en la Tabla 2, se realizó el análisis DOE en Minitab 18, para poder manipular varios factores de entrada para determinar qué efecto podrían tener para obtener el resultado deseado o mejorar el resultado, en este caso poder determinar los factores que logren producir un filamento con un diámetro promedio de 1.75mm y un rango de variación inferior a ±0.08mm, para evitar problemas al momento de la carga del filamento en la impresora.

Durante el proceso de obtención de los datos se realizó el análisis del filamento obtenido, eliminando el filamento producido durante la variación de los parámetros para evitar aglomeración y grandes variaciones en el diámetro.

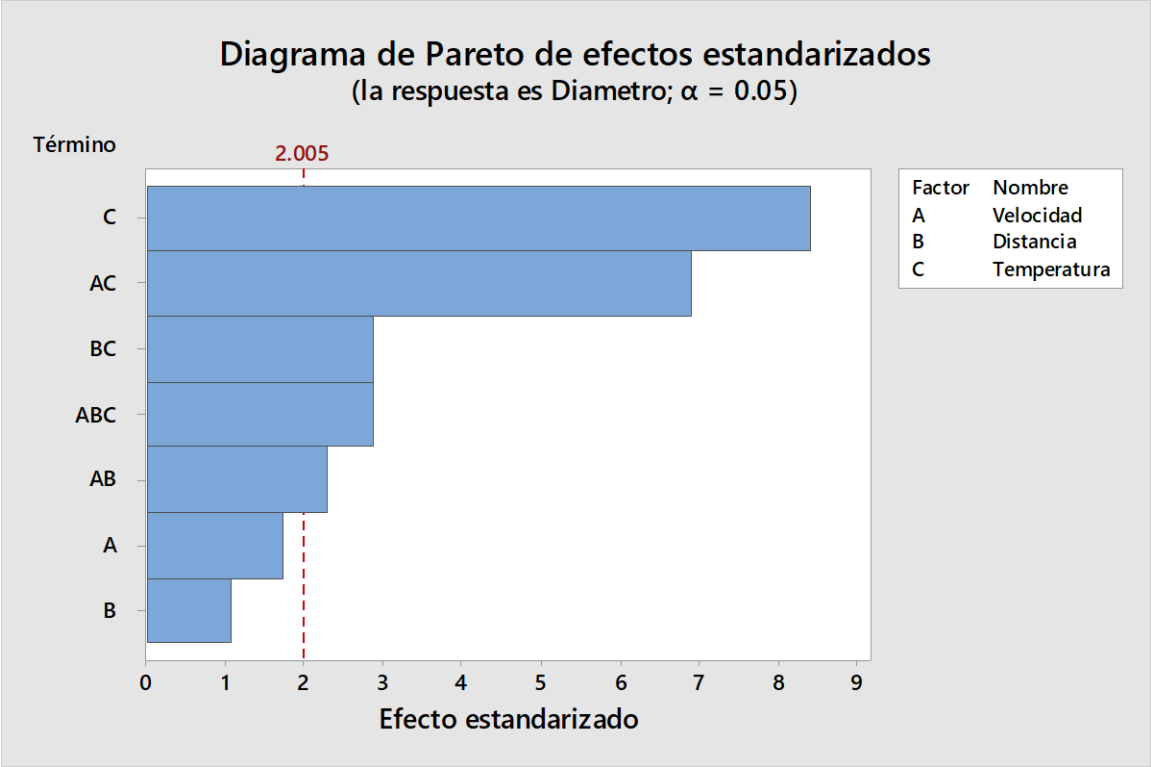

Figura 4. *Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.*

La Figura 4 presenta el diagrama de Pareto, el cual se construye ordenando las causas de mayor a menor en función de su efecto estandarizado. De esta manera, permite visualizar de manera clara y jerárquica las principales causas o categorías que están contribuyendo en mayor medida al problema en cuestión. Esto facilita la toma de decisiones para enfocar los esfuerzos de mejora en las áreas más críticas y obtener resultados significativos.

Dando como factor principal la temperatura de operación del equipo y segundo la relación entre la temperatura y la velocidad de extrusión.

Los gráficos generados a través del análisis de datos en Minitab (Figura 5) revelaron que, en la representación gráfica de la distribución normal, los datos empíricos se ajustan notablemente a las expectativas, evidenciando una concordancia cercana entre los datos observados y los valores anticipados.

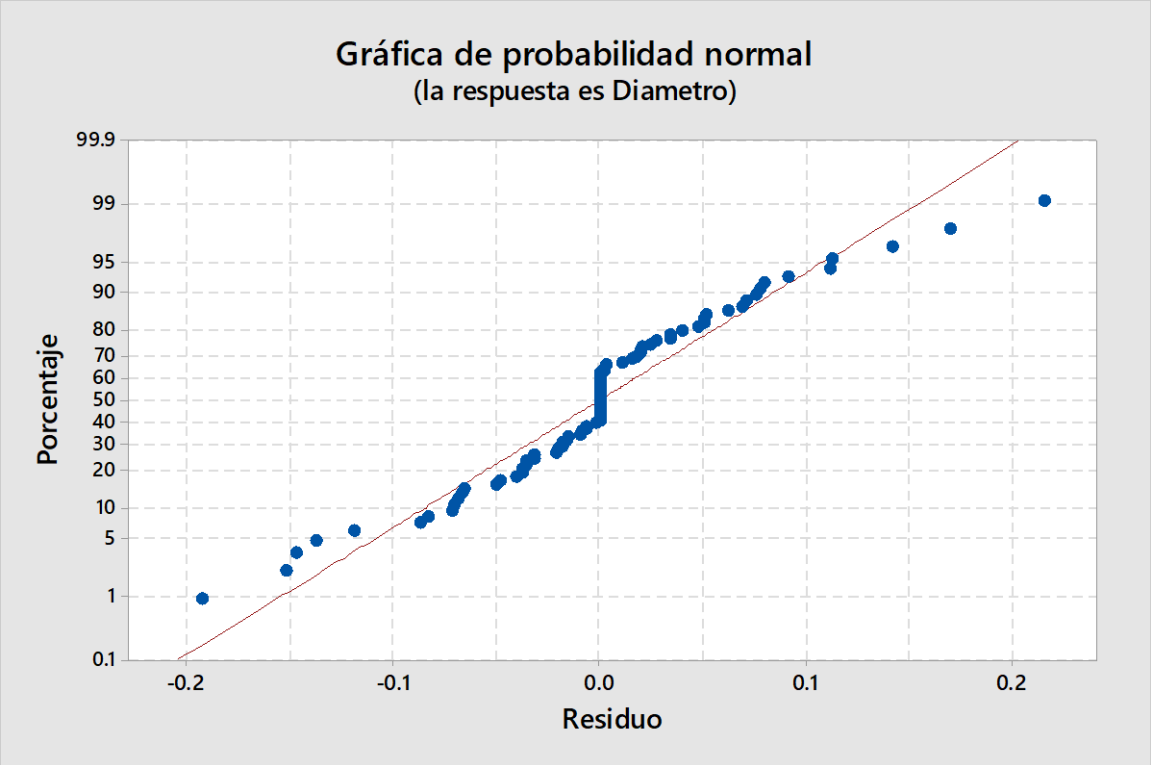

Figura 5. *Graficas de distribución normal.*

Para el análisis individual y por combinación de factores se puede utilizar la Tabla 3, la cual nos muestra el análisis de varianza, en este caso se eligió un valor p de 0.05 para determinar la significancia de los mismo. En base a esto se puede decir que el factor que más influye en el proceso es la temperatura de las zonas de extrusión, durante la interacción de factores, la combinación con la velocidad de extrusión destaca como el aspecto más relevante en comparación con la distancia de enfriamiento, que puede considerarse uno de los factores despreciables en el proceso, debido a que tiene una influencia limitada, basado en los análisis estadísticos.

***Tabla 3**. Análisis de varianza obtenido en Minitab.*

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	28	5.72732	0.20455	22.87	0.000
Bloques	2	0.00542	0.00271	0.30	0.740
Lineal	6	5.01597	0.83600	93.46	0.000
Temperatura	2	4.97709	2.48855	278.22	0.000
Velocidad	2	0.02935	0.01468	1.64	0.204
Distancia	2	0.00952	0.00476	0.53	0.590
Interacciones de 2 términos	12	0.58166	0.04847	5.42	0.000
Temperatura*Velocidad	4	0.44118	0.11030	12.33	0.000
Temperatura*Distancia	4	0.08669	0.02167	2.42	0.060
Velocidad*Distancia	4	0.05379	0.01345	1.50	0.215
Interacciones de 3 términos	8	0.12427	0.01553	1.74	0.112
Temperatura*Velocidad*Distancia	8	0.12427	0.01553	1.74	0.112
Error	52	0.46511	0.00894		
Total	80	6.19243			

5.2 VALIDACION DEL FILAMENTO PRODUCIDO

Durante el proceso de producción de filamento (Figura 5) se utilizaron los parámetros obtenidos durante el estudio realizado, con resultados muy favorables, ya que se presentó un filamento muy parejo, con una variación del diámetro de ±0.06 el cual es un resultado muy valioso para este trabajo de grado y para futuras investigaciones.



***Figura 6.** Proceso de producción de filamento.*

Debido a que el filamento producido se generó con una baja variación del diámetro y con un promedio de 1.75mm se procedió a utilizarlo para producir una probeta tipo hueso la cual se diseñó siguiendo la norma para probetas NTC-595-2007 de acuerdo con el diseño de la Figura 7, las dimensiones utilizadas son similares a las requeridas para los materiales rígidos (Tipo I ó Tipo II).

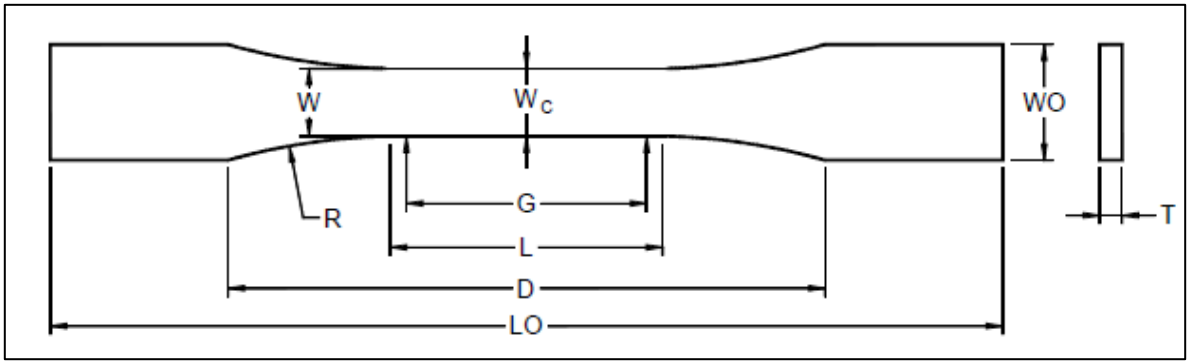

Figura 7. *Probeta para ensayo físicos.*

Luego de realizar el diseño de la probeta se procedió a la laminación, para ello se empleó el programa Cura v15.04.3, el cual nos permite modificar las propiedades de impresión, los parámetros utilizados (Tabla 4) son los mismos recomendados para el PLA comercial

Tabla 4*. Parámetros de impresión.*

File Tools Machine Expert Help

Basic | Advanced | Plugins | Start/End-GCode

Quality	
Layer height (mm)	0.1
Shell thickness (mm)	0.8
Enable retraction	☑
Fill	
Bottom/Top thickness (mm)	0.6
Fill Density (%)	100
Speed and Temperature	
Print speed (mm/s)	30
Printing temperature (C)	195
Bed temperature (C)	65
Support	
Support type	None
Platform adhesion type	None
Filament	
Diameter (mm)	1.75
Flow (%)	100.0
Machine	
Nozzle size (mm)	0.4

Durante el inicio del proceso de impresión para el cual se utilizó una impresora Artillery (Modelo: Hornet), la cual está ubicada en el laboratorio de Fisicoquímica de Bio y Nanomateriales de la Escuela de Ingeniería Química en la Universidad del Valle, no se encontraron inconvenientes al momento de utilizar el filamento producido, tanto en la purga (Figura 8) como en la impresión (Figura 9).



***Figura 8**. Purga de la impresora.*



***Figura 9.** Proceso de impresión.*

Para poder determinar la fiabilidad del filamento producido comparado con el comercial se decidió realizarle la prueba mecánica de tensión, utilizando la maquina universal de ensayos (Figura 10) equipo de marca Tinius Olsen modelo H50KS, ubicada en el Laboratorio de Cerámicos de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle sede Meléndez. Donde se utilizaron las probetas impresas con el filamento producido y con filamento comercial.



Figura 10. *Maquina Universal de ensayos.*

Para la prueba se realizó la impresión de 3 probetas de filamento comercial y 3 del filamento producido a partir de pellets de PLA, el procedimiento (Figura 11) consta de dos pinzas que sujetan la probeta de ambos extremos para posteriormente ejercer tensión en el material, los resultados se expresan en esfuerzo vs porcentaje de deformación.



***Figura 11**. Prueba de tensión.*

Los resultados obtenidos para el filamento producido a partir de pellets de PLA presentan un comportamiento similar al filamento comercial ya que presentan una zona elástica análoga, se debe tener en cuenta que el comportamiento plástico presento grandes diferencias, debido a que en el filamento producido se llegó mucho antes al fallo (Figura 12), el cual es el momento en que se rompe la probeta.

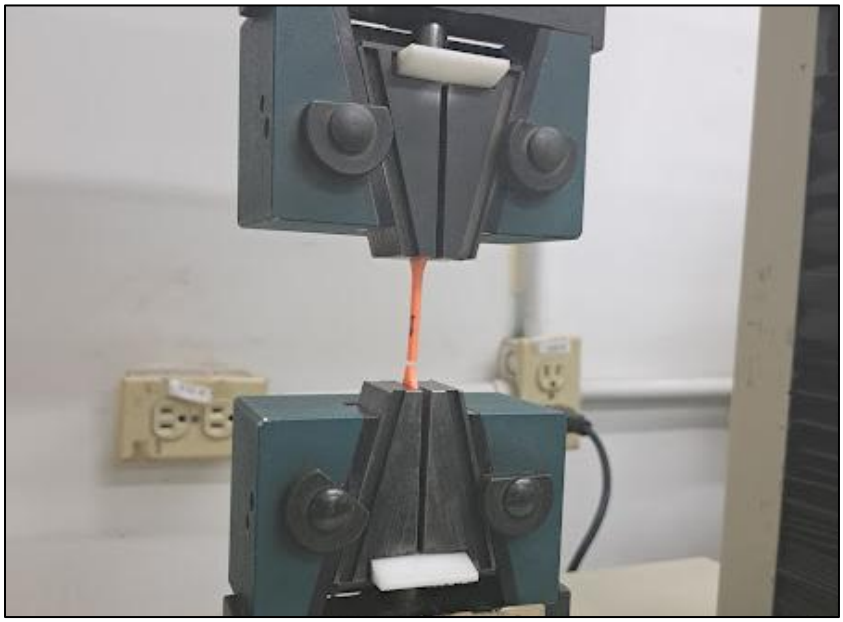

***Figura 12.** Fallo de la probeta.*

Las zonas elásticas de un material rígido se refieren a aquellas áreas donde el material puede experimentar cierta deformación antes de alcanzar su límite de elasticidad y comenzar a deformarse de manera permanente. Aunque el material en su conjunto pueda ser considerado como rígido, algunas regiones dentro de su estructura pueden mostrar cierta elasticidad bajo cargas o tensiones aplicadas. Como se observa en la Figura 13, estas zonas elásticas pueden ser importantes en aplicaciones donde se requiere cierta flexibilidad o capacidad de absorción de energía antes de que el material falle o se fracture. La figura representa el esfuerzo, medido en N/mm², que es la fuerza por unidad de área, en relación con el porcentaje de deformación, calculado como la diferencia entre la longitud final e inicial de la muestra.

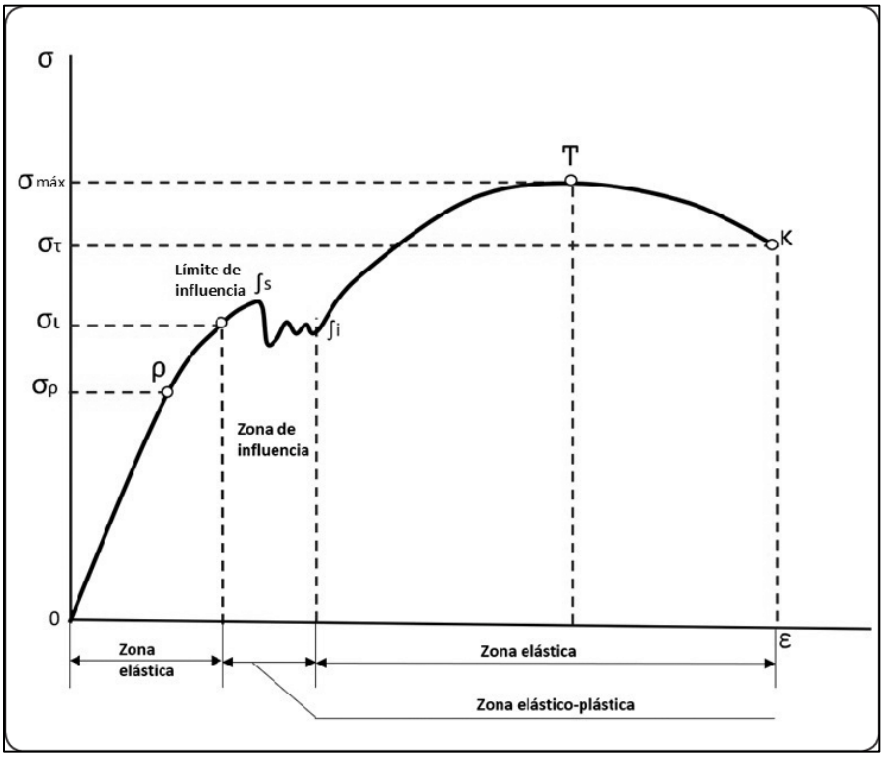

Figura 13. *Zonas de estudio basados en pruebas de esfuerzo. (Solano, 2018).*

La prueba de tensión se realizó por triplicado para aumentar la cantidad de datos y tener unos resultados con mayor veracidad. Los resultados como se puede observar en las Figuras 14 y 15 se analizaron con base a la Figura 13, nos reflejan una semejanza en las zonas elásticas, la cual es la zona donde el material se deforma a medida que aumenta el esfuerzo sin llegar al fallo. El filamento comercial presenta una zona plástica en cual la probeta sufre deformaciones permanentes y no lograría retomar a su forma original al retirar las cargas. Los resultados presentan diferencias significativas en cuanto al momento del fallo, ya que fue más pronto en el filamento producido (De Iugeilieria, 1979).

Los resultados muestran una diferencia del 22% en la prueba realizada a ambos materiales, esto abre las puertas para futuras investigaciones que impliquen la producción de filamentos de materiales compuestos con propiedades físicas específicas.

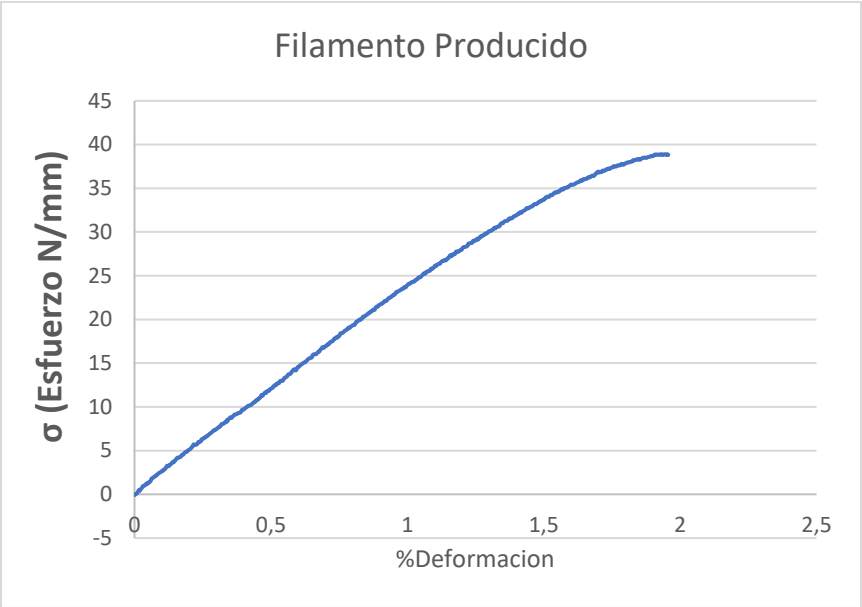

Figura 14. *Resultados prueba de tensión del filamento producido a partir de pellets de PLA.*

En el caso del PLA comercial (Figura 15) se genera una zona plástica antes del fallo de la probeta, esto se debe a que el proceso de extrusión no se realizó en una atmosfera controlada, de esta forma se evita el aumento de la humedad del material durante las etapas de transformación de Pellets a Diseño impreso. (Goetjes, 2024) Los resultados obtenidos bajo condiciones ambientales fueron adecuados y óptimos para investigar los parámetros ideales de extrusión, lo que resultó en la creación de un filamento adecuado para la impresión 3D.

(Kuo2021)

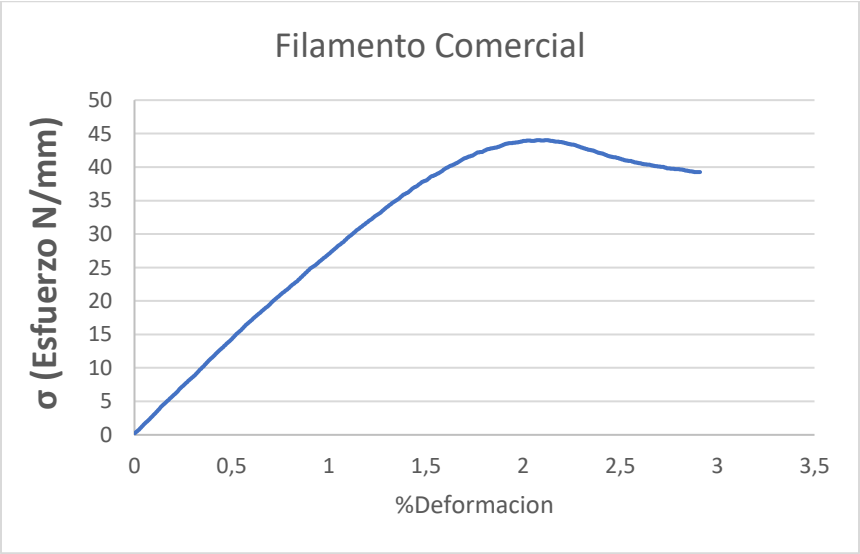

Figura 15. *Resultados prueba de tensión filamento comercial.*

Con base en los datos recopilados, se evidencia la similitud en el porcentaje de deformación, alcanzando aproximadamente un 2% justo antes del fallo del filamento en cuestión y el inicio de la zona plástica del filamento comercial. Analizando la información proporcionada por las gráficas previas se deduce que ambos filamentos tienen un módulo de elasticidad similar sin embargo la pendiente del filamento comercial es mayor, esto implica que se requiere un esfuerzo mayor antes de llegar a la zona elástico-plástica previa al fallo. Es importante señalar que el filamento comercial exhibe una deformación plástica con un porcentaje mayor hasta el punto en que finalmente falla la probeta.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de extrusión piloto para obtención de filamento para impresión 3D a partir de pellets de PLA. Los resultados mostraron que es más importante la temperatura de operación de la zona de extrusión del equipo que la velocidad a la que se realiza la formación del filamento. Adicionalmente la distancia de enfriamiento no evidenció tener un aporte importante en la calidad del material extruido. Se evidenció que el filamento obtenido no presentó ningún inconveniente al momento de implementarlo en el proceso de impresión 3D al validarlo con probetas tipo hueso con filamento producido comparado con filamento comercial.

Se realizó la puesta en marcha de un equipo de extrusión para formación de filamento a partir de pellets 3D. Se evidenció que el equipo presenta variabilidad importante en el rango de temperatura de extrusión (±5°C), que es posible configurar distancias de enfriamiento hasta 12 cm y que el equipo está en capacidad de operar a velocidades de 50 rpm siendo uno de los desempeños medio en el mercado. Se evidenció además que el control de la velocidad de tracción de los rodillos es la que controla directamente la variación del diámetro del filamento.

Se elaboró un manual de operación de este equipo de impresión 3D basado en los mejores resultados experimentales. En este se muestran las condiciones donde debe ser preferiblemente operado para garantizar buen desempeño en la fabricación de filamento a partir de pellets de PLA

Se evidenció que en todo el proceso de formación de filamento a partir de pellets de PLA es más importante la temperatura de la zona de extrusión. Fue posible evidenciar además que la velocidad y la distancia de la zona de enfriamiento tienen efecto despreciable en todo el proceso de extrusión. Las temperaturas adecuadas para la producción de un filamento con un diámetro promedio de 1.75±0.06mm apto para impresión 3D a partir de pellets de PLA es de 170°C para la zona de la boquilla y de 180°C para la zona de alimentación, con una velocidad de extrusión de 40 rpm. De igual forma la distancia entre la boquilla y la zona de enfriamiento no es un factor que afecte directamente al proceso siempre y cuando los valores no sean muy altos.

Posteriormente en los análisis físicos se comprobó la factibilidad del filamento producido, siendo que este presentó una diferencia de 22% a favor en el esfuerzo al fallo al que debe ser sometido en contraste con el filamento comercial.

6.2 RECOMENDACIONES

El proceso de extrusión puede llegar a variar si existe un cambio en la temperatura ambiente, ya que no tiene una atmosfera controlada, por ende, es recomendable fijar los parámetros adecuados para la extrusión y solo modificar la velocidad de tracción del sistema.

Luego de producir el filamento se recomienda esperar un mínimo de 2 horas antes de usarlo en el proceso de impresión, si no se cuenta con ese tiempo, se puede introducir en una zona de refrigeración a -5°C por un mínimo de 5 minutos.

Si se busca una extrusora de escritorio más compacta, se podría considerar la utilizada por Chil-Chyuan Kuo en su artículo "Optimization of Process Parameters for Fabricating Polylactic Acid Filaments Using Design of Experiments Approach", la cual cuenta con una sola zona de calentamiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta configuración limita los parámetros de operación.

El proceso de extrusión cuenta con una purga por parte de la extrusora, esto se debe a que el sistema se tiende a estabilizar luego de unos minutos luego de encender el motor del huesillo.

REFERENCIAS

Molina, P., Silva, G., Valle, V., Aldás, M. B., & Proaño, E. (2023). Study of Polylactic Acid – Achira Starch Blends Compatibilized by Polyvinyl Alcohol. Revista Politecnica, 51(2), 29–38. https://doi.org/10.33333/rp.vol51n2.03

BIS RESEARCH Inc. (2022). *DECLARACIÓN LEGAL*. https://www.shutterstock.com/image-photo/hand-phone-application-printing-human-organs-1188721555

Daly, A. (n.d.). *Medical 3D Printing, Intellectual Property and Regulation*. https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0

Grand View Research, Inc. (2021). *DECLARACIÓN LEGAL*.

Kuo, C. C., Chen, J. Y., & Chang, Y. H. (2021). Optimization of process parameters for fabricating polylactic acid filaments using design of experiments approach. *Polymers*, *13*(8). https://doi.org/10.3390/polym13081222

Martí, E. (2017, abril 28). El marco regulatorio y legal de la impresión 3d en la práctica médica. La mejor información sobre Impresión 3D. https://impresiontresde.com/marco-legal-impresion-3d-medicina/

Raju, G., Lal Sharma, M., & Meena, M. L. (2014). Recent Methods for Optimization of Plastic Extrusion Process: A Literature Review. In *International Journal of Advanced Mechanical Engineering* (Vol. 4, Issue 6). http://www.ripublication.com

Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. In *Journal of Failure Analysis and Prevention* (Vol. 14, Issue 3, pp. 343–353). Springer New York LLC. https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9

Weller, C., Kleer, R., & Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics*, *164*, 43–56. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020

Solano, Luz Georgina & Solano-Doblado, Liliana & Alamilla-Beltrán, L. & Jimenez Martinez, Cristian & Mateos, Adolfo & Wilfrido, Av & Esq, Massieu & Cda, Miguel & Stampa,. (2018). Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados bajo la licencia CC BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/). TIP Revista Especializada en Ciencias PUBLICACIÓN ANTICIPADA. 1-13.

Goetjes, V., Zarges, J. C., & Heim, H. P. (2024). Resistance of poly(lactic acid)/starch composites to weathering effects. Journal of Applied Polymer Science, 141(2). https://doi.org/10.1002/app.54768

de Iugeilieria', D. (1979). Máquina universal para prueba de resistencia materiales.