

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Diseño de una extrusora para la fabricación de filamento de impresión 3D a partir de material reciclado y con fibra de refuerzo.

Libardo Pinilla Rodríguez, Esteban Hermán Ramírez Plata.

Trabajo para optar por el título de Ingeniero Mecánico.

Director

William Pinto Hernández.

Doctorado en ingeniería mecánica.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica.

Bucaramanga

2022

Tabla de Contenido

1.	Objetivos.....	12
1.1.	Objetivo General	12
1.1.1.	Objetivos específicos.....	12
2.	Marco Teórico	13
2.1.	Marco de referencia	13
2.1.1.	Fique	13
2.1.2.	Fibra de piña.....	14
2.1.3.	PLA.....	15
2.1.4.	Materiales compuestos	16
2.1.4.1.	Ley de mezclas	17
2.1.4.1.1.	Un segundo modelo de cálculo.....	18
2.1.5.	Norma ASTM D3822-07	19
2.1.6.	Extrusora.....	20
2.2.	Estado del arte	21
2.2.1.	Caracterización mecánica de un material compuesto por fibras de coco(mesocarpio) en matriz biodegradable. Arciniegas, Marlon. Delgado Wilmer. (2019)	21
2.2.2.	Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA) reciclado y modificado con lignina. López Francisco. Barrera Sergio. (2019)	22
2.2.3.	Evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra de fique y fibra de vidrio en una matriz de resina epóxica. Navarro García. Ramírez Zambrano. (2014)	23

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

2.2.4.	Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial. Mario Muñoz et.al (2014)	24
2.2.5.	Diseño, Control Y Construcción De Un Extrusor De Filamento Para Impresión 3d. Trapero, D. (2014)	25
3.	Metodología	26
3.1.	Ingeniería inversa	26
3.1.1.	Componentes de la Extrusora.....	26
3.1.1.1.	Vista frontal.....	26
3.1.1.2.	Vista posterior de la maquina.....	28
3.1.1.3.	Vista lateral derecha	29
3.1.1.4.	Unidad puller.....	30
3.1.2.	Cálculos del motor.....	31
3.2.	Rediseño del cabezal de extrusión.....	33
3.2.1.	Requerimientos de diseño y QFD.....	33
3.2.2.	Diseño de concepto.....	35
3.2.3.	Selección de alternativa con QFD	36
3.2.4.	Cálculos de diseño	38
3.2.4.1.	Flujos volumétricos de PLA por tipo de filamento	38
3.2.4.2.	RPM del motor por tipo de filamento.....	39
3.2.4.3.	Calculo longitud de solidificación.....	41
3.2.5.	Modelado en detalle de alternativa 1	43
3.2.5.1.	Prototipado	44
3.2.5.2.	Validación y manual de uso	46

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

3.2.5.2.1.	Limpieza previa al uso	46
3.2.5.2.2.	Enhebrado de la fibra de refuerzo.....	47
3.2.5.2.3.	Puesta en marcha de la maquina	48
3.2.5.2.4.	Resultados esperados	50
3.3.	Fibras de refuerzo	50
3.3.1.	Hilos obtenidos.....	52
3.3.2.	Ensayos mecánicos de fibras y filamentos	54
3.3.3.	Resultados de los ensayos.....	56
3.3.4.	Caracterización.....	64
4.	Conclusiones	66
5.	Comentarios y recomendaciones.....	68
6.	Referencias Bibliográficas.....	69
7.	Apéndices.....	71

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la fibra de fique	14
Tabla 2. Propiedades mecánicas de la hoja de piña	15
Tabla 3. Propiedades mecánicas del PLA	16
Tabla 4 Cuadro de requerimientos PRS (product requirement specifications)	34
Tabla 5. Tabla QFD para la selección de la mejor alternativa de diseño	37
Tabla 6. tabla de datos para calculo flujo masico de PLA	38
Tabla 7. cotización mecanizada de prototipo.....	45
Tabla 8. Diámetros de los hilos y filamentos usados y obtenidos	52
Tabla 9. muestras de hilos y fibras desarrollados	54
Tabla 10. Resultados módulo de Young.....	57
Tabla 11. Resultados esfuerzo máximo.....	58
Tabla 12. Comparación de valores estimados contra valores obtenidos en los ensayos.....	62
Tabla 13. Porcentaje de error entre estimaciones y resultados de los ensayos	62
Tabla 14. Comparación de resultados obtenidos vs esperados	64

Lista de Figuras

Figura 1. Fotografía planta de fique tomada de Terra Guane S.A.S.....	13
Figura 2. Montaje de filamentos en máquina de ensayos según norma ASTM D3822-07.....	19
Figura 3. vista frontal de la maquina.....	27
Figura 4. vista posterior de la extrusora	29
Figura 5. vista lateral derecha	29
Figura 6. Unidad puller	30
Figura 7. Resultados cálculos potencia del motor.	32
Figura 8. Proceso de rediseño de la Extrusora para la fabricación de filamento reforzado	33
Figura 9. Bocetos diseños de concepto	35
Figura 10. Grafica de evaluación de desempeños de las alternativas propuestas.....	37
Figura 11. Resultados cálculo de flujos volumétricos	39
Figura 12. resultados cálculos de RPM del husillo.....	40
Figura 13. resultados calculo longitud de solidificación.....	43
Figura 14. Render de la alternativa manufacturada para la producción de filamento reforzado ...	44
Figura 15. Piezas mecanizadas para el rediseño de la extrusora	45
Figura 16. prototipo instalado en la extrusora.....	46
Figura 17. Elementos a limpiar previo al uso de la maquina	47
Figura 18. Esquema del recorrido del hilo de refuerzo en la boquilla	48
Figura 19. Panel de mando variador Movitrac LT.....	49
Figura 20. fotografía filamento reforzado PLA/fique	50
Figura 21. proceso de obtención del hilo de fibra natural desde la penca de fique.....	51
Figura 22. Fotografía de los filamentos reforzados y puros.....	53

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Figura 23. Probetas ensayo de tracción.....	55
Figura 24. Montaje de las probetas en la máquina de ensayos.....	55
Figura 25. Gráfica de fique no mercerizado muestra 1.....	56
Figura 26. Regresión lineal fique o mercerizado muestra 1.....	57
Figura 27. Grafica porcentaje de desviación estándar de las muestras.....	59
Figura 28. Esfuerzos máximos promedio de las muestras puras y de filamentos reforzados.....	60
Figura 29. Módulos de elasticidad promedio de muestras puras y filamentos reforzados.....	61
Figura 30. grafica fuerza deformación fique mercerizado.....	63
Figura 31. Boquillas: S, M y L.....	65

Lista de Apéndices

Apéndice A Código EES “cálculos de motor de extrusora”.....	71
Apéndice B Código EES predicción de propiedades por ley de mezclas	72
Apéndice C Planos alternativas de manufactura 1 y 2.....	75
Apéndice D Gráficos de hilos y filamentos ensayo de tracción	79

RESUMEN

TÍTULO: Diseño de una extrusora para la fabricación de filamento de impresión 3D a partir de material reciclado y con fibra de refuerzo. *

AUTORES: Libardo Pinilla Rodríguez, Esteban Hermán Ramírez Plata**

PALABRAS CLAVE: fibra natural, PLA reforzado, material compuesto, Extrusión, rediseño.

DESCRIPCIÓN:

El PLA destaca de otros polímeros por ser biodegradable, reutilizable y procedente de cultivos como el maíz, sin embargo, el término que realmente debería emplearse es “compostable industrialmente”. La producción de su materia prima (ácido poliláctico) requiere cerca de 2.71 kg de maíz por kilo de ácido láctico con lo cual se puede anticipar que, aunque es una de las alternativas más populares sacrifica recursos alimentarios. Con el fin de desarrollar un nuevo material compuesto a partir del PLA, pero disminuyendo el porcentaje de este se desarrollaron filamentos de PLA reforzados con fibras naturales buscando también nuevas propiedades.

Se usaron las fibras presentes en los desechos post cosecha de la piña y del fique para desarrollar hilos, los cuales se recubrieron con PLA en diferentes fracciones volumétricas para desarrollar el filamento reforzado, se realizaron cálculos aplicando ley de mezclas para estimar las propiedades del hilo y compararlas con las obtenidas en ensayos de tracción de muestras donde la fibra de refuerzo se mercerizo y otras en las que no. Para este proceso se contó con una extrusora de filamento de impresión 3D adquirida por la universidad industrial de Santander, la cual se rediseñó para la fabricación del filamento reforzado.

Esta tesis de grado concluye con la identificación de las partes de la máquina mediante un proceso de ingeniería inversa, rediseño de la máquina, planimetría de las piezas manufacturadas y cálculos para motor y filamentos; las curvas esfuerzo deformación para los distintos filamentos reforzados y la comparativa entre los mismos filamentos fabricados sin el proceso de mercerizado y con la variación de la fracción volumétrica de PLA.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: William Pinto, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: Design of an extruder for the manufacture of 3D printing filament from recycled material and with reinforcement fiber. *

AUTHORS: Libardo Pinilla Rodríguez, Esteban Hermán Ramírez Plata**

KEY WORDS: Natural fiber, reinforced PLA, composite material, Extrusion, redesign.

DESCRIPTION:

PLA stands out from other polymers for being biodegradable, reusable and from crops such as corn, however, the term that should really be used is "industrially compostable". The production of its raw material (polylactic acid) requires about 2.71 kg of corn per kilo of lactic acid, so it can be anticipated that, although it is one of the most popular alternatives, it sacrifices food resources. In order to develop a new composite material from PLA, but decreasing the percentage of this, PLA filaments reinforced with natural fibers were developed, also looking for new properties.

The fibers present in the post-harvest waste of the pineapple and the fique were used to develop threads, which were coated with PLA in different volumetric fractions to develop the reinforced filament, calculations were made applying the law of mixtures to estimate the properties of the yarn and compare them with those obtained in tensile tests of samples where the reinforcement fiber was mercerized and others in which it was not. For this process, was used a 3D printing filament extruder acquired by the Universidad industrial de Santander, which was redesigned for the manufacture of the reinforced filament and was reconditioned to operate more safely.

This thesis concludes with the identification of the parts of the machine through a process of reverse engineering, redesign of the machine, planimetry and calculations; the deformation stress curves for the different reinforced filaments and the comparison between the same filaments manufactured without the mercerizing process and with the variation of the volumetric fraction of PLA.

*Bachelor thesis

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: William Pinto, Ingeniero Mecánico.

Introducción

Los árboles alcanzan alturas de hasta 115.8 m (Lopez, 2021) teniendo como base uno de los materiales compuestos más antiguos usados por el hombre, la madera, la cual si se simplifica un poco son fibras vegetales recubiertas de una matriz de lignina. Tomando como inspiración la naturaleza se desarrollaron filamentos con matriz de PLA, el cual hará las veces de lignina y reforzarlos con fibra vegetal continua de fique y piña, con el fin de mejorar las propiedades del PLA, el cual es un material muy popular en el campo de la impresión 3D. Los filamentos reforzados se consiguieron a través del rediseño de una extrusora de filamento para impresión 3D perteneciente a la escuela de ingeniería mecánica.

Este proyecto está motivado por el gran auge que tiene actualmente el campo de la impresión 3D como algo que va más allá de un entretenimiento a ser una herramienta de prototipado rápido y que sin duda alguna ocupara un lugar fijo como lo es el Smartphone en futuros no muy lejanos; también por la necesidad de incentivar el uso de materiales verdes como lo es el PLA mejorando sus propiedades mecánicas siendo de sus principales falencias su fragilidad sin perder la característica de material biodegradable usando fibras vegetales como refuerzo en vez de fibras sintéticas.

Los filamentos reforzados se sometieron a ensayos de tracción donde a las muestras se les varió la fracción volumétrica del PLA y el tipo de fibra de refuerzo siendo las utilizadas: la fibra de fique, la fibra de fique mercerizada y la fibra de piña. Con los ensayos se hizo una comparación para ver la influencia que tiene el proceso de mercerizado, la variación de la fracción volumétrica y el tipo de fibra para establecer que combinaciones ofrecen mejoras significativas frente al filamento de PLA puro.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Producir Filamento de PLA reforzado con fibra natural a partir del rediseño de una extrusora de filamento de impresión 3D, con el fin de contribuir al desarrollo de la misión de la Universidad Industrial de Santander de generar y transmitir conocimiento.

1.1.1. Objetivos específicos

Realizar el proceso de ingeniería inversa de la extrusora adquirida por la escuela de ingeniería mecánica, identificando sus componentes, evaluando su funcionamiento, cálculos de diseño y modo de operación.

Rediseñar el cabezal de extrusión para la fabricación de filamento con fibra de refuerzo con diferentes calibres de hilo y diámetros finales de filamento.

Caracterizar mecánicamente las combinaciones de la matriz (PLA) y filamento de refuerzo (fibra de piña y fibra de fique) según los parámetros de la norma ASTM D3822-07.

2. Marco Teórico

2.1. Marco de referencia

2.1.1. *Fique*

Se asemeja al *Agave* tiene forma de suculenta, grande, de las hojas en formación de roseta, con presencia de picos en el filo de sus hojas, la planta se puede ver en la figura 1.

Figura 1.

Fotografía planta de fique tomada de Terra Guane S.A.S



Tiene su origen en América Tropical sobre todo en la región Andina de Colombia y Venezuela. del fique se aprovecha solo el 4%, el cual corresponde a la fibra que contiene, la fibra del fique se usa en la elaboración de cuerdas, alpargatas y redes. El 96 % restante de la planta tiene múltiples usos como lo son la producción de abonos orgánicos, producción de champiñones, concentrado para compost, alimento para ganado, insecticidas y fungicidas (cartilla técnica de cultivo de fique, 2019). Las propiedades mecánicas consultadas para la fibra de fique se pueden ver en la tabla 1.

Tabla 1.

Propiedades mecánicas de la fibra de fique

Propiedades mecánicas fibra de fique	
Temperatura de degradación térmica	220 C
Densidad aparente	0.87g/cm ³
Esfuerzo máximo	237 MPa
Módulo de elasticidad E	8.01 Gpa
Deformación máxima a la rotura	6.02%

obtenida de la revista Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial (MARIO FERNANDO MUÑOZ-VELEZ, 2014)

2.1.2. Fibra de piña

La fibra de hoja de piña se caracteriza por tener propiedades mecánicas superiores a otras fibras naturales e incluso similares a la de fibras sintéticas (María Rebeca Hodgson Rojas, 2018)

Su extracción se realiza mediante métodos manuales en los cuales se golpea la hoja, se raspa, lava, peina y se seca. También se realiza la separación de la fibra mediante procesos mecánicos con molinos, cilindros, entre otros donde se obtiene fibras más integras cuya resistencia mecánica puede llegar a ser del doble al no quebrar la fibra durante su extracción.

Según el trabajo de Rebeca y colaboradores es necesario el baño con NaOH (mercerizado) porque elimina residuos de la hoja que disminuyen su punto de degradación térmica, también hay datos que sugieren un aumento de la resistencia máxima a la tensión de un 40 % para fibras mercerizadas. Las propiedades mecánicas de la fibra de se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2.

Propiedades mecánicas de la hoja de piña

Propiedades de la fibra de piña obtenidas de (Kasim, 2015)

PROPIEDAD	VALOR
Resistencia máxima	170-290MPa
Resistencia máxima fibra mercerizada	420 MPa
Temperatura de degradación	197°C
Temperatura de degradación fibra mercerizada	322°C
Módulo de Young	34-82 GPa
Deformación máxima a la rotura	1.6-8 %

2.1.3. PLA

El ácido Poli láctico es un polímero compostable industrialmente es decir bajo parámetros controlados de temperatura y microorganismos, lo cual pone en discusión el uso del término biodegradable, no se puede desechar de manera deliberada. Mezclar el PLA con materiales como el PET puede entorpecer el proceso de reciclado de ambos materiales. Se produce a partir de cultivos como el maíz, trigo y yuca. La producción de un kilogramo de ácido láctico (materia prima del PLA) se requiere 2.76 kilogramos de maíz (Howard, 2019) Ambientalmente tiene un impacto

menor que el uso de recursos fósiles, pero puede suponer una crisis en términos de recursos alimenticios.

Cuando se procesa el PLA se produce un olor dulce que no es desagradable, pero es inseguro inhalar los gases que expulsa principalmente por los aditivos que pueda contener.

Es especialmente susceptible a la humedad, pero modificando los componentes se puede mejorar esta falencia, las propiedades mecánicas del PLA se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3.

Propiedades mecánicas del PLA

PROPIEDAD	VALOR
Módulo de Young	3.3 a 3.6 GPa
Límite elástico	55-72 MPa
Resistencia a la Tracción	47 a 70 MPa
Tenacidad a la fractura	3-5 MPa/m ²
Temperatura de fusión	145 a 177 °C
Temperatura de vitrificación	52 a 60 °C
Temperatura máxima de servicio	55 °C

2.1.4. Materiales compuestos

Un material compuesto es aquel conformado por 2 o más constituyentes que le otorgan propiedades únicas que no se pueden obtener a partir de los constituyentes originales (Askeland) y que forman regiones lo suficientemente grandes para ser llamado un medio continuo. Siempre y cuando tengan una buena unión en su interfaz (Hashin, 1983) puede ser llamado material compuesto. La correcta interacción entre los componentes se denomina sinergia. Algunos ejemplos

de materiales compuestos son el hormigón reforzado con varilla corrugada de acero estructural, el acero galvanizado, los huesos y los músculos entre otros.

2.1.4.1. Ley de mezclas

La Ley de las Mezclas fue propuesta por Voigt en 1889 es la técnica de homogeneización más sencilla que puede aplicarse en un material compuesto (Jeronimo, 2012). Consiste en calcular las propiedades intermedias de un material compuesto a partir del aporte de cada uno de los componentes (ver ecuación 1), es aplicable al caso de filamentos reforzados con fibra continua si se tienen los casos de isodeformación e isotención, depende también de la orientación del esfuerzo aplicado y la predicción de cual componente fracturará primero. Las ecuaciones para la ley de mezclas y las hipótesis que se plantean con cada ecuación se pueden ver en las siguientes ecuaciones:

$$P_c = \sum_{i=1}^{i=n} V_i * P_i$$

Nota: P_c es propiedad del material compuesto, esta primera ecuación es la forma general, V_i es fracción volumétrica del componente i y P_i es la magnitud de la propiedad que se está calculando, pero para el componente “ i ”.

Para el caso de un filamento reforzado con ambos componentes paralelos la propiedad módulo de elasticidad quedaría de la siguiente forma:

$$E_c = E_{PLA} * V_{PLA} + V_{fibra} * E_{fibra}$$

Nota: E_c : módulo de elasticidad del material compuesto, E_{pla} : módulo de elasticidad del material compuesto, V_{pla} : fracción volumétrica del PLA, E_{fibra} : módulo de elasticidad de la fibra de refuerzo, V_{fibra} : fracción volumétrica de la fibra de refuerzo.

La resistencia última del material según la ley de mezclas está determinada por la resistencia del refuerzo con una posible contribución de la matriz (PLA) el valor dependerá de quien fracture

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

primero si la matriz o el refuerzo, las ecuaciones para el caso donde fractura primero la fibra y donde rompe primero la matriz son las siguientes respectivamente:

$$\sigma_c = \sigma_{ref} * v_{ref} + \sigma'_{PLA} * v_{PLA}$$

$$\sigma_c = \sigma_{ref} * v_{ref}$$

Nota: σ_c es la resistencia del material compuesto, σ_{ref} es la resistencia de la fibra de refuerzo, v_{ref} es la fracción volumétrica de la fibra de refuerzo, σ'_{PLA} es el esfuerzo que soporta la matriz (el PLA) al momento en que fractura en refuerzo (la fibra), v_{PLA} : es la fracción volumétrica de PLA

$$\sigma'_m = \frac{\sigma_{ref}}{e_{ref} * E_{PLA}}$$

Se prevé que para el caso en cuestión de matriz de PLA reforzado con hilos de fique o piña fracture primero la matriz, pero ambos casos fueron calculados (fractura primero refuerzo y fractura primero matriz), el código EES con las ecuaciones se encuentra en el apéndice B.

2.1.4.1.1. Un segundo modelo de calculo

La medición de los diámetros de las probetas tiene una incertidumbre promedio de 0.08 [mm] esta incertidumbre al tratarse de áreas pequeñas tendrá una propagación que se prevé pueda ser significativa, del orden de hasta 25 MPa en el cálculo de esfuerzos máximos lo cual para el caso de la fibra de fique puro superaría el 10% de error, solo producto de la medición, para comprobar si el error obtenido es en gran medida o no consecuencia de la medición se realizó un cálculo tipo en la muestra con mayor porcentaje de error donde en vez de calcular el esfuerzo máximo y el módulo de Young se calculó la constante de rigidez K.

La constante de rigidez se toma de la pendiente formada por la curva fuerza VS deformación que son los datos que entrega de forma directa la máquina de ensayos entonces:

$$K_{fil_{refor}} = V_{PLA} * K_{PLA} + V_{ref} * K_{Ref}$$

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Nota: las constantes del PLA y del refuerzo se obtienen de los ensayos realizados, y la K resultante se compara con la K experimental del material compuesto.

2.1.5. Norma ASTM D3822-07

Esta norma se utiliza para la medición de las propiedades de tracción de filamentos de fibras sencillas naturales o artificiales que tengan la longitud suficiente para su adecuado montaje en una máquina de tracción, en ella se proporcionan las instrucciones para medir la fuerza de rotura y las propiedades de tracción de las fibras, además, debido a la influencia de la longitud de las fibras en el cambio del valor de la resistencia a la tracción es necesario tener varias muestras.

El montaje de las muestras se realiza con ayuda de unas mordazas especiales que sostienen las fibras de manera vertical y alineadas de forma centrada a los extremos de la máquina de ensayos, la longitud de la fibra y la velocidad del ensayo pueden variar según el tipo de muestras que vayan a ser sometidas a los ensayos y el material de estas, brindando esta norma una guía para estos valores, pero siendo finalmente una decisión del que desarrolla la prueba.

Montaje de las fibras en las mordazas

Figura 2.

Montaje de filamentos en máquina de ensayos según norma ASTM D3822-07



2.1.6. Extrusora

Es una máquina que fuerza un material fundido a través de una boquilla, el material adopta la forma del orificio que atraviesa en la boquilla produciéndose un perfil de sección uniforme.

En el proceso de extrusión de plástico, la máquina se alimenta de un material granulado de tamaño uniforme denominado pellets, el cual se transforma en un producto extruido al pasar por las tres secciones en las que se divide el husillo. La primera sección, es la de alimentación o *feed* en donde se recibe el material desde una tolva y se le aplica un precalentamiento, para ser transportado hacia la siguiente. La segunda sección, es conocida como la de compresión, en la cual el polímero se transforma para adquirir consistencia intermedia entre líquido y sólido, se extrae el aire entre los pellets y se comprime el material. La última zona corresponde a la sección de dosificación, donde se homogeniza el material fundido y se genera presión para bombearlo hacia la boquilla de conformado. Antes de llegar a la boquilla, el fundido pasa por un paquete de pantallas llamada “placa rompedora”, que contiene agujeros axiales pequeños. Esta placa sirve para filtrar contaminantes y grumos duros del fundido, generar presión en la sección media y forzar al flujo de material a borrar su “memoria” para eliminar la propiedad viscoelástica del polímero, y así eliminar su historia, la cual le una tendencia a girar después de salir de la boquilla, esta historia se adquiere a lo largo del barril consecuencia de la torsión aplicada.

Cuando la pieza sale de la boquilla, en este caso un filamento continuo, se debe enfriar de forma controlada, algunos polímeros son bastante susceptibles al estrés térmico y otros al medio de enfriamiento, un ejemplo es la susceptibilidad del PLA al agua característica que impide un enfriamiento por agua en algunos casos. Los medios más populares de enfriamiento son aire (usando ventiladores) y enfriamiento por agua (usando tanques o pequeñas bombas).

Para el caso de extrusoras de filamento es necesario un subsistema adicional, el de arrollado, el cual se encarga de recolectar el filamento en carretes, para llevar el filamento de la boquilla a la zona de arrollado se usa un puller, el cual es un motor pequeño que se encarga de halar el filamento sin quebrarlo.

Las variables que se pueden usar para controlar la producción y la calidad del filamento son las presentes en los subsistemas mencionados anteriormente y son: la velocidad angular del husillo (RPM), la temperatura de las resistencias (tres temperaturas una por cada zona), el diámetro de la boquilla, la velocidad angular del puller y el método de enfriamiento.

2.2. Estado del arte

2.2.1. Caracterización mecánica de un material compuesto por fibras de coco(mesocarpio) en matriz biodegradable. Arciniegas, Marlon. Delgado Wilmer. (2019)

En el presente trabajo se desarrolló un material compuesto con fibras de coco y una matriz biodegradable a la cual se le evaluaron sus propiedades por medio de un ensayo de tracción. Las fibras de coco fueron tratadas con una solución alcalina de hidróxido de sodio para eliminar impurezas y sustancias que no tuvieran buena adherencia con la matriz, después de eso fueron mezcladas con la matriz en diferentes proporciones de porcentaje peso a peso de fibra/matriz, las cuales fueron (0/100), (10/90), (20/80) y (30/100). Finalmente se realizó un ensayo de tracción para obtener las propiedades mecánicas y posteriormente analizar el efecto de las fibras de coco en las mismas, para de esta forma determinar la composición que causa una mayor mejora en las propiedades de este.

Tras realizar la respectiva unión entre la matriz y las fibras en las proporciones mencionadas se procedió a realizar el ensayo de tracción según como indica su norma específica, tras realizar esto se pudo evidenciar que el uso de la fibra de coco genero un gran incremento en

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

las propiedades mecánicas llegando a triplicar el esfuerzo ultimo y aumentar el módulo de elasticidad más de 9 veces para el caso de proporción (20/80) resultando ser este el que más beneficios arrojaba, aun así, con el uso de solo 10% de fibra de coco ya se vio un aumento en las propiedades del mismo, llegando así a concluir que la fibra de coco como material de refuerzo es una opción viable a la hora de mejorar las propiedades mecánicas de un material.

Este proyecto es de utilidad para saber las precauciones que se deben tener al trabajar con fibras de coco como refuerzo, además de mostrar que la misma termina siendo una buena opción a la hora de mejorar las propiedades mecánicas de un material arrojando en la proporción correcta mejoras muy altas en las mismas.

2.2.2. Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA) reciclado y modificado con lignina. López Francisco. Barrera Sergio. (2019)

En este proyecto se reforzó PLA reciclado modificándolo con 3 diferentes concentraciones de lignina (1%, 3% y 5%) para mejorar así sus propiedades y tener la oportunidad de darle un segundo uso a dicho material, por medio de los ensayos de tensión y flexión se obtuvieron las propiedades mecánicas de las 3 concentraciones diferentes, el PLA reciclado sin refuerzo y el PLA puro, realizando una comparación entre las propiedades de estas y determinando cual posee mejores propiedades.

De los resultados obtenidos se pudo ver que el PLA reciclado presento un incremento en el módulo de Young y el porcentaje de deformación, pero el esfuerzo ultimo termino disminuyendo, por lo cual se pudo concluir que puede ser útil para aplicaciones que requieran menor esfuerzo que el PLA, pero requieran de una mayor ductilidad. Por otro lado, el uso de lignina como refuerzo solo fue útil para el caso de 1% ya que ahí se vio un aumento en las propiedades para los otros se evidencio que había una reducción de estas siendo inversamente proporcional a

la cantidad de lignina. Se terminó concluyendo que, aunque el PLA reciclado puede llegar a tener una nueva oportunidad de uso, más aún con la cantidad de concentración de lignina adecuado no puede llegar a suplir al PLA puro, aun así, puede llegar a tener un uso en algunas aplicaciones específicas.

Este trabajo nos proporciona una idea clara sobre cómo reacciona el PLA al implementarse un material de refuerzo y como pueden llegar a cambiar sus propiedades, por lo cual es importante encontrar una proporción adecuada en la mezcla para lograr así un resultado fructífero.

2.2.3. Evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra de fique y fibra de vidrio en una matriz de resina epóxica. Navarro García. Ramírez Zambrano. (2014)

En esta investigación se desarrolló un material compuesto con una matriz de resina epóxica, la cual fue reforzada con fibra de fique y fibra de vidrio, se le evaluaron sus propiedades por medio de ensayos de tensión, flexión e impacto. Se comenzó analizando las propiedades de ambas fibras por medio de los ensayos mencionados anteriormente para de esta forma lograr obtener una caracterización de estas, después de eso se procedió a realizar una caracterización de las propiedades de la matriz y en base a estos resultados se optó por la mejor opción para realizar la mezcla del material compuesto con las diferentes fibras de refuerzo. Finalmente se realizaron los respectivos ensayos según la norma para obtener las propiedades mecánicas y posteriormente analizar el efecto de las diferentes fibras y sus proporciones, para de esta forma determinar si estas pueden llegar a causar un efecto positivo en el material.

Tras realizar las pruebas y determinar los resultados para las distintas composiciones se pudo evidenciar que el uso de la fibra de fique no aumenta mucho el esfuerzo máximo siendo necesario una proporción de fibra de vidrio para causar una buena mejora en las propiedades,

siendo muy superior la fibra de vidrio por sí sola, pero llegando a tener un resultado óptimo en una proporción 50/50 de estas fibras. Esto mismo paso con el módulo de elasticidad el cual disminuye si se usa solo fibra de fique y en una proporción 50/50 obtiene una ganancia a pesar de no ser muy alta, y finalmente en cuanto a la deformación la fibra de fique mostro ser mejor aun así no sería recomendable usarla pura totalmente. De esta manera se llegó a concluir que la fibra de fique como material de refuerzo es una opción viable a la hora de mejorar las propiedades mecánicas de un material, aunque estas no llegan a mejorar mucho sus propiedades.

Este proyecto es de utilidad para saber las precauciones que se deben tener al trabajar con fibras de fique como refuerzo, además de mostrar que la misma termina siendo una buena opción a la hora de mejorar las propiedades mecánicas de un material, aunque estas pueden llegar a ser no muy altas.

2.2.4. Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial. Mario Muñoz et.al (2014)

En este trabajo se estudian las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y térmicas de fibras naturales de fique, aptos de ser usadas como refuerzo de matrices poliméricas. Las fibras fueron sometidas a modificaciones superficiales a partir de tratamientos químicos que convencionalmente son empleados para promover la compatibilidad de las fibras naturales (hidrofilicas) con matrices de naturaleza polimérica (hidrofóbicas). El proceso de modificación superficial de las fibras se llevó a cabo mediante un tratamiento de alcalinización con NaOH, seguido del injerto de un agente de acoplamiento tipo silano y finalmente una preimpregnación con polietileno. Mediante la ejecución de ensayos de FTIR se logró observar los grupos funcionales típicos de las fibras nativas y se corroboró la correcta ejecución de las modificaciones superficiales propuestas; de igual

manera, la caracterización térmica por TGA permitió evidenciar la pérdida de hemicelulosa y lignina que fueron removidas con el tratamiento alcalino

2.2.5. Diseño, Control Y Construcción De Un Extrusor De Filamento Para Impresión 3d.

Trapero, D. (2014)

Este trabajo presenta el proceso de diseño y construcción de una extrusora de filamento para impresión 3D de bajo costo, reproducibilidad de diseño y que de conocimiento público. Para su desarrollo se analizaron los diferentes componentes que integran una extrusora con ayuda del lenguaje de programación Python para una selección adecuada de los mismos y a partir de eso se fueron seleccionando los siguientes componentes para la elaboración final del equipo a diseñar. Además, se le aplicaron diferentes pruebas al filamento producido para comprobar si este cumple con las características funcionales para ser utilizado por una impresora 3D convencional. El proceso de diseño se empieza con una demanda de producción de filamento, la cual define las dimensiones del husillo o tornillo, el cual es el elemento principal del extrusor y a través de este mismo se van diseñando o seleccionando los demás elementos que lo componen. Como se mencionó antes con el uso de Python se hace una simulación para estimar las diferentes condiciones de trabajo en función del tamaño del tornillo y de esta forma se selecciona el óptimo. Posteriormente se plantea una guía para ir seleccionando las otras partes y varios consejos sobre el ensamblaje de estas. Finalmente, se realizan unas pruebas de calidad.

Este proyecto contribuye brindando un conocimiento profundo de las partes que constituyen una extrusora, de cómo se integran los subsistemas y algunos consejos para corregir la defectología que surge en el filamento.

3. Metodología

3.1. Ingeniería inversa

El presente proyecto cuenta con una extrusora funcional, capaz de trabajar con PLA, ABS y PET. La extrusora carece de un manual de uso y por ello a través de un proceso de ingeniería inversa se identificaron sus componentes principales: motor, tornillo, barril, cabezal, controles, resistencias y sensores; se realizaron pruebas para determinar el rango de operación de las RPM, capacidad máxima de pellets, temperatura en las tres zonas del cilindro; tiempos de espera para el correcto proceso de fundido del PLA, cálculo para determinar la potencia del motor y la presión al interior del barril dado que se desconoce a falta de sensores de presión, variable vital en una extrusora, los cálculos se hicieron tomando como guía la teoría presente en el libro “transformación de plásticos” (Savgorodny, 1978).

El proceso de ingeniería inversa culmina con la entrega de una lista de componentes de la máquina, un breve instructivo del proceso de encendido, condiciones de operación y con algunas sugerencias para la posterior mejora de la máquina.

3.1.1. Componentes de la Extrusora

Los componentes y su función se mencionan a continuación y están agrupados en función de la vista en la cual son visibles; las vistas son frontal, posterior, lateral derecha y un módulo adicional que es la unidad puller.

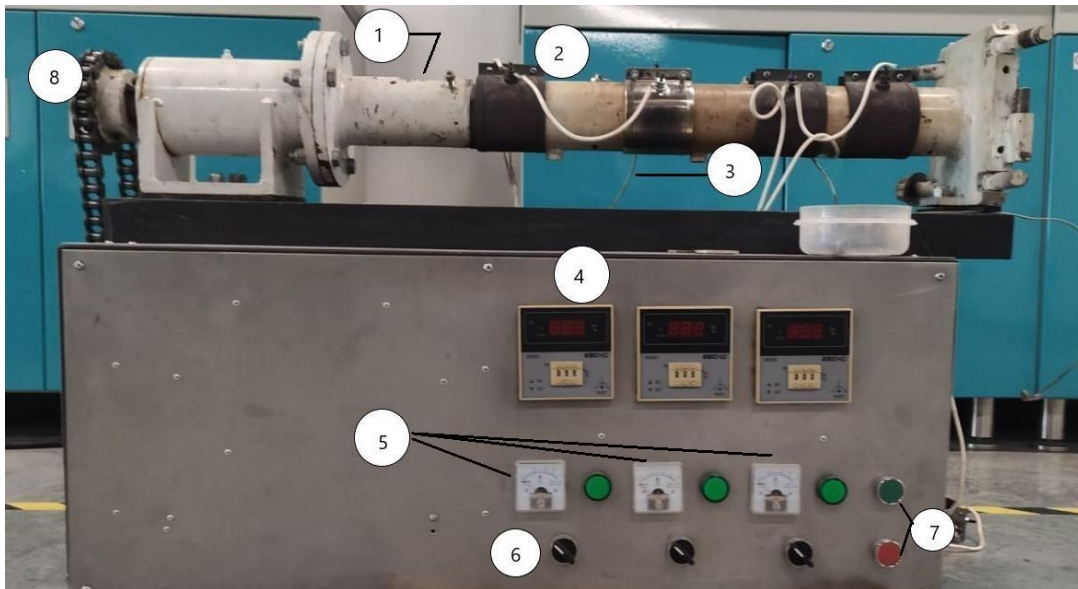
3.1.1.1. Vista frontal

Las variables temperatura y encendido del motor se pueden controlar desde el panel que trae la maquina en su vista frontal como se muestra en la figura 3.

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Figura 3.

vista frontal de la maquina



Nota: 1 feed o ingreso de pellets, 2 resistencias, 3 termocuplas, 4 pirómetros, 5 amperímetros, 6 interruptores, 7 interruptores del motor y 8 transmisión por cadena.

El feed conecta con una tolva y en dicha tolva se vierten los pellets, dado la condición actual de funcionamiento no se pueden verter más de 125 g de pellet. Las resistencias que rodean el barril son de 300 Watts cada una a 220V, hay dos para cada zona exceptuando la última zona (la cabeza de extrusión), las resistencias deben estar bien acopladas al barril con la mínima holgura para evitar que se dañen por sobrecalentamiento. Las termocuplas son de tipo J las cuales pueden operar en temperaturas entre 0 y 400 [°C] y están ubicadas en el punto medio entre cada zona del barril. Los pirómetros son de la marca ZCEBOX referencia EBCHQ 58520, cada uno controla la temperatura de la zona del barril correspondiente en un intervalo de 0 a 399 [°C]. los amperímetros son de la marca ZCEBOX y la referencia es EBCHQ 82010, es un amperímetro análogo que maneja un rango de 0 a 10 A en AC. Los interruptores son de dos posiciones, encienden las resistencias cada interruptor la zona correspondiente. El pulsador verde enciende el motor el cual no empezara a

rotar hasta que se pulse un segundo botón de color verde ubicado en el variador, el pulsador rojo apaga el motor. La transmisión es por cadena, por la parte posterior está conectada con una relación uno a uno.

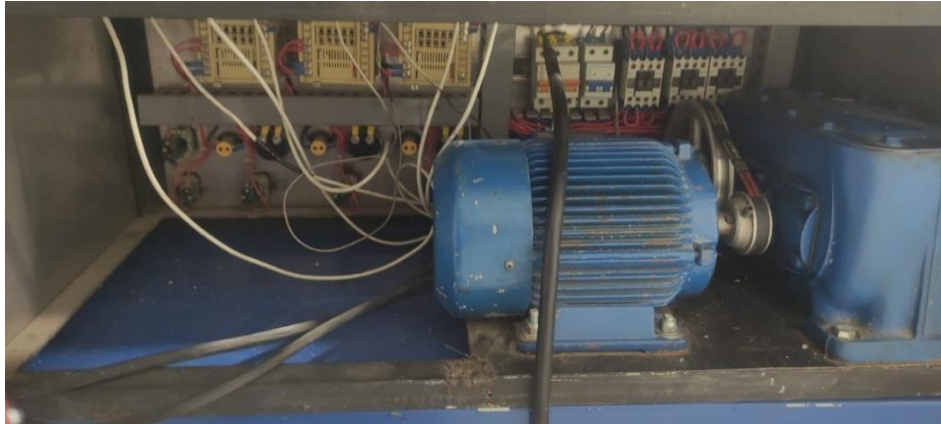
3.1.1.2. Vista posterior de la maquina

Oculto en la parte posterior de la maquina se puede apreciar el sistema de potencia de la extrusora la cual lo conforman un Motor SIEMENS 1LA3 trifásico de 2.4 HP a 220/440 V de 4 polos, la transmisión entre el motor y el reductor es por correas. La conexión entre el motorreductor y el husillo se logra mediante la cadena mencionada en el apartado anterior, cuyo piñón de salida de potencia conecta directamente con el husillo y está asegurado con una chaveta.

El control de velocidad del motor está a cargo del Variador de frecuencia de la marca MOVITRAC referencia LT Se encarga de variar las RPM que entrega el motor, maneja hasta 4 fases diferentes, una vez se energiza (usando el pulsador verde del panel frontal) el motor iniciara su movimiento si se pulsa un segundo botón ubicado en el variador, el variador puede cambiar su frecuencia de 200 a más de 1120 RPM. Otros componentes del circuito eléctrico son: los Breakers de riel marca CHINT referencia NB1-63 C6, Se encargan de interrumpir la corriente eléctrica si esta llega a superar los valores máximos hay uno a la entrada del motor y para cada contactor de resistencia y Los Contactores marca CHINT NC1-1210: Se encarga de establecer o interrumpir la corriente eléctrica, para mantener la temperatura en el set point seleccionado en los pirómetros. La máquina se alimenta con corriente AC trifásica. La vista posterior de la maquina se ve en la figura 4.

Figura 4.

vista posterior de la extrusora

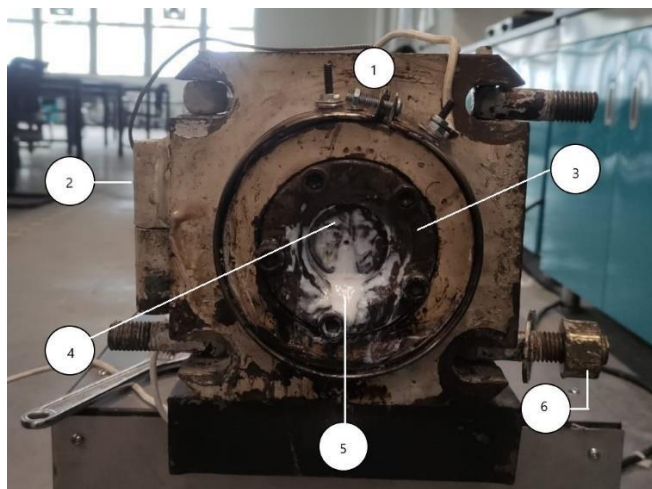


3.1.1.3. Vista lateral derecha

Desde esta vista se aprecia la Cabeza de extrusión conformada por dos tapas de acero que contienen el dado que inicialmente usaba la máquina, el cual se introdujo a presión y fue necesario removerlo con prensa, adicional a ello estaba asegurado con una brida atornillada con 5 tornillos brístol, en la figura 5 se puede ver la vista lateral derecha.

Figura 5.

vista lateral derecha



Nota: 1 tapa de extrusión de la máquina, 2 pivote de la tapa al soltar las tuercas de sujeción permite acceder al interior del barril sin necesidad de remover la tapa, 3 brida de sellado, 4 boquilla original

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

de la máquina, asegurada a presión, 5 derrame de PLA virgen por sobrecalentamiento y 6 tuercas de sujeción una en cada esquina.

La tapa esta pivotada en un pasador y se asegura con 4 tornillos ubicados en cada esquina de la cabeza, sobre el cuello exterior de la cabeza se ubica la última de las 5 resistencias que tenía inicialmente la máquina.

3.1.1.4. Unidad puller

Es la encargada de arrollar el material producido, el control de velocidad se da mediante una resistencia ubicada en el panel de control del puller ubicado en la cara lateral derecha de la unidad puller. A esta unidad le constituye un motor conectado a dos cilindros y un carrete mediante dos correas, el puller se refrigera mediante un ventilador ubicado junto al motor, entre el puller y la cabeza de extrusión hay la posibilidad de conectar un tanque para enfriamiento por agua, el agua del tanque se puede calentar usando una resistencia eléctrica que se debe sumergir en el agua y encender solo si hay agua en el tanque.

Figura 6.

Unidad puller



3.1.2. Cálculos del motor

Los cálculos de la potencia del motor se realizaron tomando como referencia la teoría presente en el libro “transformación de plásticos” de V.K Savgorodny, para estos cálculos se asume la extrusora como una bomba helicoidal, por razones prácticas se asume el tornillo inmóvil y que quien rota es el barril junto con otras hipótesis que se pueden ver en el capítulo 1 “máquinas de extrusión del autor ya mencionado.

Las ecuaciones usadas en el código EES que se entrega en el apéndice 1 son:

$$Q = \alpha * n - \beta * (\text{DELTA}_p / \mu_{\text{efec}}) - \gamma * \left(\frac{\text{DELTA}_p}{\mu_{\text{efec}}} \right) \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

La primera ecuación corresponde al caudal de polímero fundido que se pretende obtener, se desea inicialmente una producción de 2 kg/h, comparando con maquinaria presente en la industria la demanda para una maquina ronda los 30 kg/h. las siguientes ecuaciones corresponden a los coeficientes de los tipos de flujos previamente mencionados: flujo forzado o de arrastre, flujo de presión y flujos de filtraciones respectivamente cuyos coeficientes son Alpha, beta y gamma respectivamente.

$$\text{Alpha} = \frac{\pi * m * D * h * \left(\left(\frac{t}{m} \right) - e \right) * (\cos(\text{phi}))^2}{2}$$

Alpha corresponde al coeficiente adimensional de flujo de arrastre el cual corresponde al fluido que arrastra el husillo en el sentido de tornillo.

$$\text{Beta} = \frac{(m * h^3 * \left(\left(\frac{t}{m} \right) - e \right) * \sin(\text{phi}) * (\cos(\text{phi}))^2)}{12 * L}$$

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

beta corresponde al coeficiente de flujo que se devuelve por causa de la presión desarrollada siendo máximo cuando se tapa la cabeza de la extrusión, asumiendo cero las filtraciones el caudal es la diferencia entre el flujo de arrastre y el de presión.

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \zeta^3 * \tan(\phi)}{10 * e * L}$$

Gamma corresponde al coeficiente de fugas y suele ser muy bajo.

$$Pot = (\pi * 3 * D * 3 * n * 2) * L * \frac{\mu_{efec}}{h} + \alpha * \frac{\Delta P}{\cos^2(\phi)} + \frac{\pi * 2 * D * 2 * n * 2 * e * L * \mu_{efec}}{\zeta * \tan(\phi)} [Kw]$$

La ecuación de potencia se obtiene integrando el área superficial del tornillo y μ_{efec} es la viscosidad efectiva del PLA o viscosidad a determinada velocidad de cortadura la cual se desconoce para el PLA, pero para cálculos prácticos se usó el valor máximo obtenido para el polietileno que se puede visualizar en el libro de Savgorodny. Los resultados se pueden visualizar en la figura 7.

Figura 7.

Resultados cálculos potencia del motor.

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\alpha = 0.000003953$	$\beta = 5.899E-11$	$D = 0.038 [m]$	$\Delta p = 1.450E+07 [Pa]$	$e = 0.005 [m]$
$\gamma = 1.297E-10 [m^3]$	$h = 0.005 [m]$	$L = 0.8 [m]$	$m = 1 [canales]$	$\mu_{efec} = 70 [Pa*s/10^8]$
$n = 10 [rpm]$	$\phi = 20 [^\circ]$	$Pot = 3067 [kw]$	$pot_{HP} = 4.113 [Hp]$	$P_{atmosferas} = 143.1 [atm]$
$Q = 4.480E-07 [m^3/h]$	$t = 0.02 [m]$	$\zeta = 0.001 [m]$		

Según los cálculos la potencia del motor se queda corta, el motor de la maquina es de 2.4 HP, comparando con las extrusoras usadas en la industria las cuales para una producción de 30 Kg/h usan motores de 10 HP. Otro factor que corrobora estos cálculos es el hecho de que en la tolva no se debe introducir más de 125 g de pellet porque el tornillo se frena y con ello se quema la correa que conduce del motor al reductor.

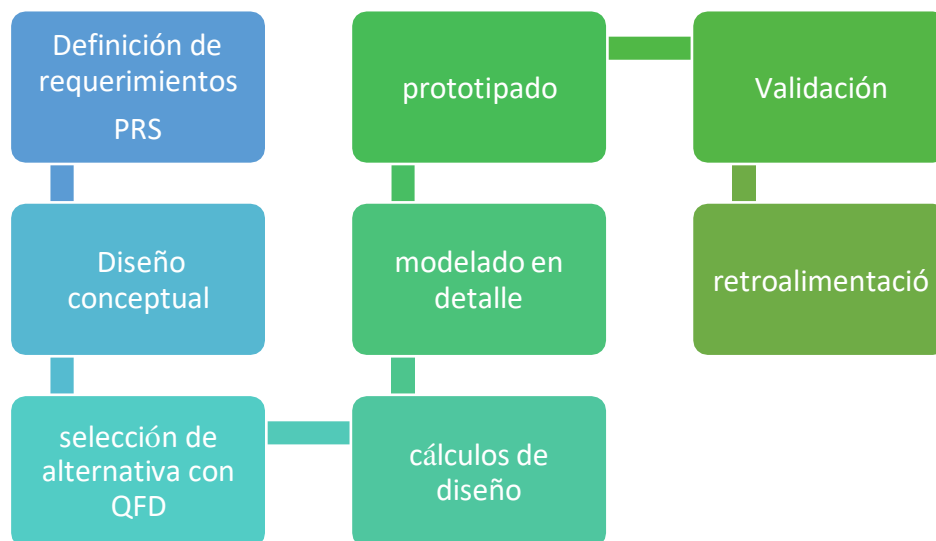
3.2. Rediseño del cabezal de extrusión

El rediseño de la extrusora se concentra en la modificación de la cabeza, se identificó que la boquilla original se encuentra asegurada a presión en la tapa lo cual obligo al a su extracción con prensa, durante el proceso de desarme se contemplaron algunos requerimientos y también se identificaron algunas restricciones de forma con el fin de minimizar el número de piezas a fabricar.

El proceso de rediseño se encuentra esquematizado en la figura 8 y en la fase de metodología se desarrolla hasta la selección de la mejor alternativa.

Figura 8.

Proceso de rediseño de la Extrusora para la fabricación de filamento reforzado



3.2.1. Requerimientos de diseño y QFD

Los requerimientos de diseño se obtuvieron analizando primero las limitaciones dimensionales que tiene la extrusora, dentro de estas limitaciones esta que las modificaciones que se hagan deben ser revertibles para poder seguir usando la extrusora en la producción de filamento puro en sus condiciones iniciales. La tapa de la cabeza de extrusión es un componente robusto, complejo de remplazar y costoso por ende se propuso que cualquier pieza que se diseñe deberá poder acoplarse a la tapa.

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Otros requerimientos como la necesidad de repuestos se identificaron durante la documentación dado que las boquillas de las impresoras 3D suelen ser de Latón un material con alto nivel de desgaste lo cual constituye un problema dado que el desgaste será mayor en una máquina que produce el filamento que frente a una que lo usa, otro factor que destaca la necesidad de tener repuestos son las roscas que se puedan estropear durante el proceso de limpieza en frío de las piezas, para tener alternativas se consultaron algunos materiales destacando en las búsquedas los aceros inoxidable martensíticos, este tipo de acero se consultó con los talleres de mecanizado para tener recomendaciones, otras alternativas y asegurar la disponibilidad de material.

Todos los requerimientos se encuentran documentados en la tabla 4.

Tabla 4

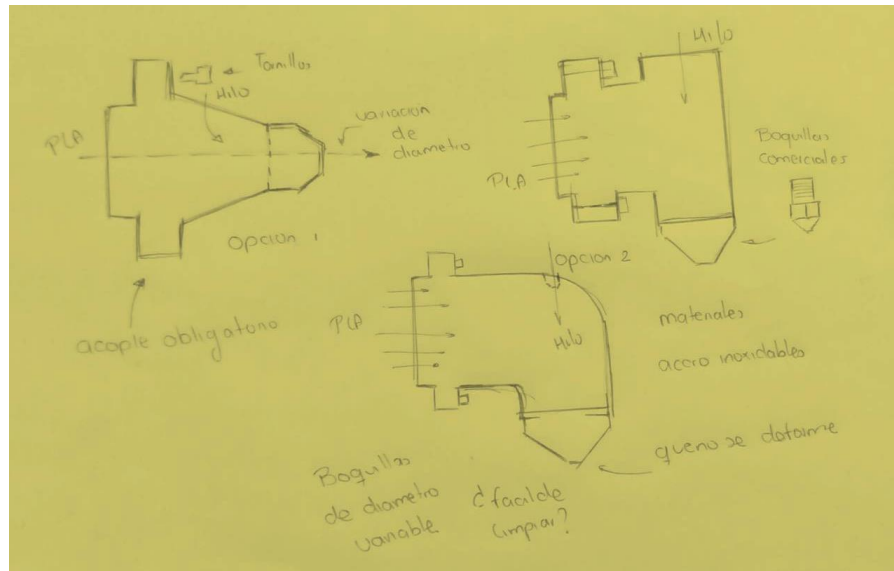
Cuadro de requerimientos PRS (product requirement specifications)

Requerimiento (Qué)	Descripción (como)
Compatibilidad con la tapa actual	Dimensiones compatibles con la tapa obtenidas con el modelado de la tapa en SolidWorks
Repuestos	Fácil cambio de piezas que requieran limpieza o susceptibles de desgaste
Presupuesto	Cotización con la mejor relación calidad precio, se realizaron 3 cotizaciones.
No se oxide	material resistente a la oxidación
No se deforme por calor	material resistente a la deformación térmica
Limpieza	geometría de fácil limpieza
Diferentes diámetros de filamento	boquillas intercambiables
Sin fugas	diseño adecuado, evitando perforaciones extra, esquinas o puntos de estancamiento
Pocas piezas	diseño simple con menor número de piezas posibles
Acabado superficial interno liso	geometría interna sencilla con el acabado más liso posible de preferencia en CNC

3.2.2. Diseño de concepto

Figura 9.

Bocetos diseños de concepto



Nota: de izquierda a derecha las alternativas son 1, 2 y 3.

La alternativa 1 consiste en el mecanizado de una pieza en forma de cono cuya base es estándar, limitada por la tapa de extrusión y esa forma se mantiene para las alternativas 2 y 3, el cono cuenta con un tornillo prisionero en su interior que se encarga de guiar el hilo para que se recubra concéntrico con el revestimiento de PLA. la boquilla va roscada en la punta del cono, es intercambiable y tendrá diferentes diámetros finales.

La alternativa 2 está diseñada para extrusión en vertical, se planea que pueda manufacturarse a partir de un codo de tubería al cual se le suelda la base estándar y se taladra sobre el codo para introducir la fibra, el filamento reforzado sale por el extremo que tiene la boquilla enroscada.

La alternativa 3 está diseñada para manufacturarse a partir de una conexión de tres puntas o tubería en T, se espera que con este diseño se mejore la concentricidad respecto a la alternativa

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

2 por ser más fácil taladrar de forma precisa la entrada de la fibra respecto a la boquilla de salida, este diseño depende de la disponibilidad de piezas de tubería con el material adecuado y con dimensiones cercanas a las de la base estándar.

3.2.3. Selección de alternativa con QFD

Para determinar la mejor alternativa se realizó un análisis de las 3 opciones de diseño con ayuda de un diagrama QFD. En el QFD se tuvieron en cuenta los requerimientos recolectados en el PRS dándole un valor de prioridad entre 1 a 5 siendo 5 el de mayor prioridad, tras esto se plantearon las formas en cómo se obtendrían dichos requerimientos, finalmente se procedió a completar y realizar el respectivo análisis QFD presente en la tabla 5, el QFD arrojó como resultado Que la mejor alternativa de diseño es la numero uno la cual es el cono para extrusión en horizontal. El resultado se puede apreciar en la grafica

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

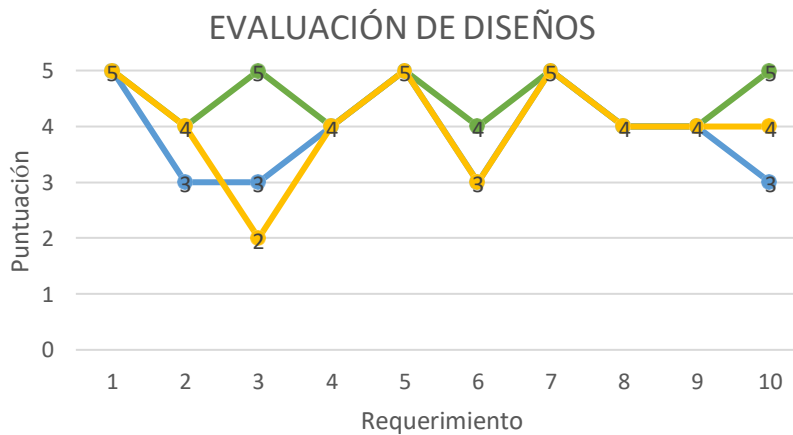
Tabla 5.

Tabla QFD para la selección de la mejor alternativa de diseño

		Cómo?	EVALUACIÓN COMPARATIVA 5 = MEJOR 1 = PEOR													
		Qué?	PRIORIDAD	Dimensiones compatibles con la tapa.	Facilidad en el cambio de piezas	Cotización mas económica	Material resistente al óxido	Material con alta resistencia térmica	Ensamblaje que facilite la limpieza	Boquillas de diferentes tamaños	Diseño adecuado	Diseño simple	Forma interna sencilla de maquinari	DISEÑO 1	DISEÑO 2	DISEÑO 3
FUERTE=	MEDIA=	DEBIL=		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
I. REQUERIMIENTOS																
1	Compatibilidad con la tapa actual	5	⊙								○			5	5	5
2	Repuestos	3		⊙						⊙				4	3	4
3	Presupuesto	4				⊙	○	○		△			○	5	3	2
4	No se oxide	4				○	⊙	△	△					4	4	4
5	No se deforme por calor	5				○	△	⊙				△		5	5	5
6	Limpieza	3		⊙					⊙	○	○	○		4	3	3
7	Diferentes diámetros de filamento	5		○					△	⊙		○		5	5	5
8	Sin fugas	4									⊙	○		4	4	4
9	Pocas piezas	3		○					○			⊙		4	4	4
10	Acabado superficial interno liso	4				○					○	△	⊙	5	3	4

Figura 10.

Gráfica de evaluación de desempeños de las alternativas propuestas



Nota: el trazado verde en la gráfica corresponde a la alternativa 1, el trazado azul es la alternativa

2 y el trazado naranja la alternativa 3.

3.2.4. Cálculos de diseño

Teniendo como base la geometría cónica de la alternativa seleccionada los datos a calcular son los caudales requeridos para la producción de filamentos de diámetro 0.5 mm, 1 mm y 1.5 mm, estos diámetros se escogieron teniendo en cuenta los calibres de los filamentos de impresión 3D usados, Otro limitante es la máxima capacidad del barril siendo esta un estimado de 125 g de material teniendo en cuenta que valores por encima causan que el barril se frene. Para calcular la geometría del cono es requerida la longitud máxima la cual estará limitada por el volumen de los 125 g de PLA, el flujo masico requerido para el revestimiento de los filamentos el cual será entre un 60 y 70 % de PLA y la máxima disipación de calor permitida en función de la longitud.

3.2.4.1. Flujos volumétricos de PLA por tipo de filamento

La velocidad de halado se determinó midiendo el tiempo que toma a un metro de filamento puro ser extruido la cual es de 66.7 s con lo cual se estima una velocidad de extrusión de 0.015 m/s. Se procedió a hallar el caudal que tendrían las 3 boquillas diseñadas, las cuales fueron nombradas según su tamaño como S (pequeña), M (mediana) y L (grande). Para esto se determinaron las áreas de cada una, teniendo la condición de que solo el 65% era PLA y por lo cual esta fracción de área seria la que se usaría para el cálculo del caudal. Finalmente se multiplicaron los valores de área obtenidos por la velocidad de salida del filamento obteniendo así el caudal de cada boquilla.

Tabla 6.

tabla de datos para calculo flujo masico de PLA

Diámetro boquilla S	0.5 mm
Diámetro boquilla M	1 mm
Diámetro boquilla L	1.5 mm
Velocidad de extrusión	0.015 m/s

Con los datos de la tabla 6 se calcula el área de la sección transversal del filamento que se produjo y esa área se multiplicada por la velocidad y la fracción volumétrica de PLA se obtuvo el flujo masico volumétrico de PLA. dividiendo el flujo volumétrico en la densidad se obtiene el flujo masico.

$$A = \pi * \left[\frac{D}{2}\right]^2 \quad [m^2]$$

$$flujo_{vol} = A * Vel * fra_{PLA} \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

Figura 11.

Resultados cálculo de flujos volumétricos

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg
 $A_L = 0,000001767 \quad [m^2]$ $A_M = 7,854E-07 \quad [m^2]$ $A_S = 1,963E-07 \quad [m^2]$ $D_L = 0,0015 \quad [m]$ $D_M = 0,001 \quad [m]$
 $D_S = 0,00,02 \quad [m]$ $Q_L = 1,723E-08 \quad [m^3/s]$ $Q_M = 7,658E-09 \quad [m^3/s]$ $Q_S = 1,914E-09 \quad [m^3/s]$ $V = 0,015 \quad [m/s]$

Nota: D_S es el diámetro de la boquilla pequeña, D_M es el diámetro de la boquilla mediana, D_L es el diámetro de la boquilla grande, V es la velocidad de salida del PLA, A_S es el área de la boquilla pequeña, A_M es el área de la boquilla mediana, A_L es el área de la boquilla grande, Q_S es el caudal de la boquilla pequeña, Q_M es el caudal de la boquilla mediana, Q_L es el caudal de la boquilla grande.

3.2.4.2. RPM del motor por tipo de filamento

Con los caudales calculados se procedió a determinar los valores de operación de la extrusora para cada boquilla, para esto se utilizaron las ecuaciones del cálculo de motor que se encuentran en la sección mencionada y en el apéndice C, se estableció la potencia del motor de 2,4 Hp y el caudal respectivo para cada caso. Los valores obtenidos para cada boquilla se encuentran en la figura 12.

Figura 12.

resultados cálculos de RPM del husillo

Boquilla S

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\alpha = 0,000003953$	$\beta = 5,899E-11$	$D = 0,038$ [m]	$\Delta p = 6,711E+06$ [Pa]
$e = 0,005$ [m]	$\gamma = 1,297E-10$ [m ³]	$h = 0,005$ [m]	$L = 0,8$ [m]
$m = 1$ [canales]	$\mu_{efec} = 25$ [Pa*s/10 ⁸]	$n = 12,81$ [rpm]	$\phi = 20$ [°]
$Pot = 1790$ [kw]	$pot_{HP} = 2,4$ [Hp]	$P_{atmosferas} = 66,23$ [atm]	$Q = 1,914E-09$ [m ³ /s]
$t = 0,02$ [m]	$\zeta = 0,001$ [m]		

Boquilla M

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\alpha = 0,000003953$	$\beta = 5,899E-11$	$D = 0,038$ [m]	$\Delta p = 6,710E+06$ [Pa]
$e = 0,005$ [m]	$\gamma = 1,297E-10$ [m ³]	$h = 0,005$ [m]	$L = 0,8$ [m]
$m = 1$ [canales]	$\mu_{efec} = 25$ [Pa*s/10 ⁸]	$n = 12,81$ [rpm]	$\phi = 20$ [°]
$Pot = 1790$ [kw]	$pot_{HP} = 2,4$ [Hp]	$P_{atmosferas} = 66,22$ [atm]	$Q = 7,658E-09$ [m ³ /s]
$t = 0,02$ [m]	$\zeta = 0,001$ [m]		

Boquilla L

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\alpha = 0,000003953$	$\beta = 5,899E-11$	$D = 0,038$ [m]	$\Delta p = 6,709E+06$ [Pa]
$e = 0,005$ [m]	$\gamma = 1,297E-10$ [m ³]	$h = 0,005$ [m]	$L = 0,8$ [m]
$m = 1$ [canales]	$\mu_{efec} = 25$ [Pa*s/10 ⁸]	$n = 12,81$ [rpm]	$\phi = 20$ [°]
$Pot = 1790$ [kw]	$pot_{HP} = 2,4$ [Hp]	$P_{atmosferas} = 66,21$ [atm]	$Q = 1,723E-08$ [m ³ /s]
$t = 0,02$ [m]	$\zeta = 0,001$ [m]		

Con los resultados de estos cálculos se pudo obtener las RPM de operación de la extrusora para las 3 boquillas y las presiones internas que maneja. La variación de estos valores es casi nula entre las diferentes boquillas, esto se debe a que la variación de los diámetros de estas es de menos de 1 mm por lo cual no terminan variando mucho las condiciones de operación. Por lo tanto, se puede establecer que las RPM de operación sean las mismas sin importar que boquilla se esté utilizando.

3.2.4.3. Calculo longitud de solidificación

Debido a la necesidad de desarrollar un sistema por el cual pasara la fibra de refuerzo en el cabezal de extrusión fue necesario que este tuviera una longitud mayor a los que se tienen normalmente, por lo cual fue necesario determinar la longitud máxima que puede llegar a tener sin que se solidifique el PLA. De esta forma se procedió a plantear un modelo con el cual se pudiera estimar esta longitud máxima, donde las condiciones eran el diámetro del cabezal de extrusión, las temperaturas de inicio y final, el caudal que se manejaba según cada boquilla y la temperatura del ambiente.

Variable	magnitud	Variable	Magnitud
T salida del barril	160 °C	T ambiente	23 °C
T solidificación PLA	145 °C	Cp_PLA	1180 [J/kg*K]

Para el análisis térmico se asumió la temperatura del aire ambiente constante, la cual se encontraba en convección natural con el dado de extrusión, la forma de este se manejó como un tubo de diámetro constante y espesor insignificante, esto se hizo debido a que simplificaría en gran medida su análisis, además de que las variaciones con la forma original solo serían de unos pocos milímetros, por lo cual no significaría un gran cambio para el análisis.

La temperatura 1 estaba condicionada a la temperatura que proporcionaba la resistencia, la cual era de 160°C y la temperatura 2 por la temperatura de fusión del PLA asegurando así que este no se solidificara en algún punto y la temperatura del aire se tomó como el promedio de la temperatura en el laboratorio la cuál era de 23°C.

También fue necesario el calor específico y densidad del PLA para los cálculos que se debían realizar estos se sacaron de la bibliografía mencionada anteriormente. Finalmente, el coeficiente

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

de transferencia de calor por convección se sacó de la tabla mostrada a continuación, tomando el valor más alto para tomar así la condición máxima de transferencia de calor.

Datos

$$T_1 = 160 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$
$$T_2 = 145 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$
$$T_a = 23 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$
$$C_{p\text{PLA}} = 1,18 \cdot 10^3 \text{ } [\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}]$$
$$D_{\text{PLA}} = 1,24 \cdot 10^3 \text{ } [\text{kg}/\text{m}^3]$$
$$Q = 1,91441 \times 10^{-9} \text{ } [\text{m}^3/\text{s}]$$
$$h = 5 \text{ } [\text{W}/\text{m}^2\text{ } ^{\circ}\text{C}]$$
$$D = \frac{18}{1000} \text{ } [\text{m}]$$

Cálculos de temperaturas

$$T_{\text{Prom}} = \frac{T_1 + T_2}{2} \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$
$$\Delta T = T_1 - T_2 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$
$$T_{\text{Sup}} = \frac{T_{\text{Prom}} + 23}{2} \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

Cálculo del flujo másico

$$\dot{m} = D_{\text{PLA}} \cdot Q \text{ } [\text{kg}/\text{Seg}]$$

Cálculo del área

$$A = \pi \cdot D \cdot L \text{ } [\text{m}^2]$$

Cálculo de la transferencia de calor

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_{p\text{PLA}} \cdot \Delta T \text{ } \text{W}$$
$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_{\text{Sup}} - T_a) \text{ } \text{W}$$

Nota: T1 es la temperatura en el punto 1, T2 es la temperatura en el punto 2, Ta la temperatura del aire en el ambiente, CpPLA es el calor específico del PLA, DPLA es la densidad del PLA, Q es el caudal, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, D es el diámetro del cabezal de extrusión, TProm es la temperatura promedio entre T1 y T2, ΔT es la diferencia de temperatura entre T1 y T2, TSup es la temperatura superficial del cabezal de extrusión, ṁ el flujo másico del PLA, A es el área superficial del cabezal de extrusión y Q es el calor transferido

Una vez establecidas las condiciones del problema, se empezó con el cálculo de la temperatura promedio, la temperatura total y la variación de temperaturas, después se determinó el flujo másico de PLA y se expresó el área en función de la longitud, posterior a esto se plantearon las ecuaciones

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

de transferencia de calor y se realizaron los cálculos respectivos para determinar la longitud máxima. Estos resultados se encuentran en la figura 13.

Figura 13.

resultados calculo longitud de solidificación

Boquilla S

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg				
A = 0,0001298 [m ²]	C _{PPLA} = 1180 [J/Kg ^{°C}]	D = 0,018 [m]	ΔT = 15 [°C]	D _{PLA} = 1240 [kg/m ³]
h = 5 [W/m ² °C]	L = 0,002295 [m]	\dot{m} = 0,000002374 [Kg/s]	Q = 1,914E-09 [m ³ /s]	\dot{Q} = 0,04202 [W]
T ₁ = 160 [°C]	T ₂ = 145 [°C]	T _a = 23 [°C]	T _{Prom} = 152,5 [°C]	T _{Sup} = 87,75 [°C]

Boquilla M

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg				
A = 0,0005191 [m ²]	C _{PPLA} = 1180 [J/Kg ^{°C}]	D = 0,018 [m]	ΔT = 15 [°C]	D _{PLA} = 1240 [kg/m ³]
h = 5 [W/m ² °C]	L = 0,00918 [m]	\dot{m} = 0,000009495 [Kg/s]	Q = 7,658E-09 [m ³ /s]	\dot{Q} = 0,1681 [W]
T ₁ = 160 [°C]	T ₂ = 145 [°C]	T _a = 23 [°C]	T _{Prom} = 152,5 [°C]	T _{Sup} = 87,75 [°C]

Boquilla L

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg				
A = 0,001168 [m ²]	C _{PPLA} = 1180 [J/Kg ^{°C}]	D = 0,018 [m]	ΔT = 15 [°C]	D _{PLA} = 1240 [kg/m ³]
h = 5 [W/m ² °C]	L = 0,02066 [m]	\dot{m} = 0,00002137 [Kg/s]	Q = 1,723E-08 [m ³ /s]	\dot{Q} = 0,3782 [W]
T ₁ = 160 [°C]	T ₂ = 145 [°C]	T _a = 23 [°C]	T _{Prom} = 152,5 [°C]	T _{Sup} = 87,75 [°C]

Como se puede observar la longitud máxima permitida es de unos pocos milímetros, por lo cual al ser necesario el sistema de paso de la fibra de refuerzo no se puede cumplir con dicha longitud, por esta razón es necesario agregar una resistencia en la punta que garantice que la temperatura de salida del PLA sea de 160°C.

3.2.5. Modelado en detalle de alternativa 1

El modelado de las piezas se realizó en el programa SolidWorks, las piezas modeladas fueron la tapa, tomado las medidas originales para validar que las piezas restantes sean

compatibles, el cono de extrusión, 3 boquillas de diámetros 0.5 mm, 1mm y 1.5 mm, el tornillo prisionero y los tornillos Bristol de sujeción, de las piezas modeladas no se mandaron manufacturar la tapa y los tornillos pues son originales de la máquina. En la figura 14 está el ensamble renderizado que se mandó a manufacturar y en el apéndice C los planos.

Figura 14.14

Render de la alternativa manufacturada para la producción de filamento reforzado



3.2.5.1. Prototipado

La alternativa 1 se mandó mecanizar con la empresa Fresados Santander el material en el cual se mecanizo fue acero 4140, un material versátil resistente a los cambios de temperatura manejable en torno y para las boquillas se mecanizo en acero Cold Rolled con el fin de evitar que los diámetros de salida de las boquillas, de diámetro reducido, se cerraran por efecto de la expansión térmica.

Para la manufactura fue necesario cotizar con tres empresas resultando ganadora la empresa Fresados Santander, los valores cotizados y los detalles de la manufactura se pueden ver en la tabla 6. El resultado se puede ver en la figura 15 lamentablemente no se tomó la foto cuando se

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

entregaron las piezas sino posterior a sus primeros usos por ello la figura 15 no muestra el estado en que se entregaron que era reluciente.

Tabla 7.

cotización mecanizada de prototipo

Empresa	Valor cotizado	Especificaciones
Fresados Santander	1'070.000 COP	Fabricación en 4140 y boquillas en cold rolled.
Martec	4'522.000 COP	Fabricación en acero AISI 4140.
Metalca	3'339.140 COP	Fabricación en acero inoxidable martensítico con CNC y con Tratamiento térmico.

Figura 15.15

Piezas mecanizadas para el rediseño de la extrusora



DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

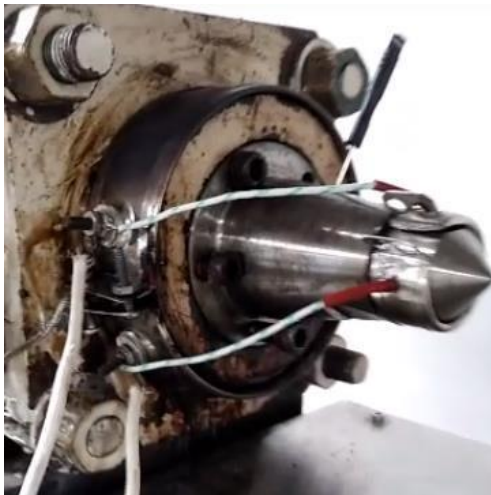
Nota: la fotografía se encuentra ambientada, los elementos que se mandaron mecanizar fueron las tres boquillas, el cono y el tornillo prisionero que se encuentra al interior del cono. La resistencia se mandó hacer con la empresa Resistencias Santander

3.2.5.2. Validación y manual de uso

Para el proceso de validación se pone en uso el prototipo visto en la imagen 15, dicho prototipo se instala en el cabezal de la extrusora como se ve en la figura 16

Figura 16.16

prototipo instalado en la extrusora



En pocas palabras el funcionamiento de la extrusora para la fabricación de filamento reforzado es el siguiente: limpiar la cabeza de extrusión para remover material de usos previos, de ser posible en frio, enhebrar el hilo de refuerzo, esperar a que la extrusora llegue a la temperatura de los setpoints puestas en los pirómetros, esperar un tiempo extra a que el material funda completamente y dar inicio al motor. El proceso en detalle se explica a continuación y en la figura 14 se encuentra el árbol de procesos.

3.2.5.2.1. Limpieza previa al uso

Los pasos para comenzar a extruir son los siguientes: previo a la operación se debe limpiar la maquina si tuvo usos posteriores, se aconseja limpiar en frio por ende es el primer paso para usar

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

la máquina, de no ser posible la remoción de la boquilla deberá calentarse la máquina, pero este debe ser el último recurso, la extrusora deberá estar desconectada aun si se calentó previamente, debe apagarse y desconectarse. la limpieza consta de la remoción de la boquilla de la tapa y la extracción del material de previos usos, teniendo cuidado de no estropear las roscas de las diferentes piezas de la tapa. Si se desea reutilizar el material se deberá triturar a un tamaño similar al de los pellets, el material que se debe remover se puede ver en la figura 17.

Figura 17.

Elementos a limpiar previo al uso de la maquina



Nota: se deben limpiar los restos en caso de fuga y extraer el tapón que se forma en la boquilla cuando quedan restos de material usos previos se aconseja hacer cuando la maquina esta fría, en lo posible hacerlo sin desacoplar la boquilla por razones de practicidad. Las cajas en la boquilla y en el cono son para acoplar llave inglesa y extraer las piezas.

3.2.5.2.2. Enhebrado de la fibra de refuerzo

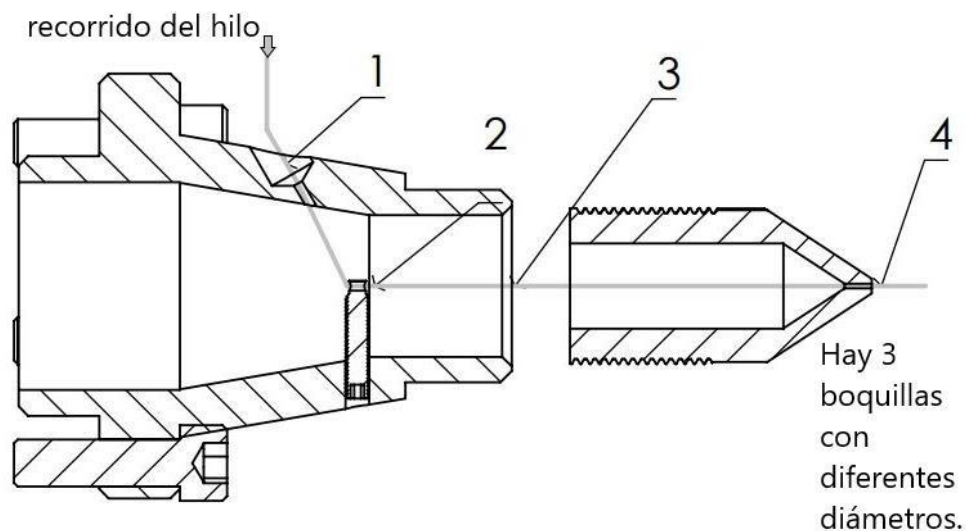
Se desmonta el cono y la boquilla, se limpian ambas piezas en frio luego se introduce el hilo de refuerzo por el agujero (1) el cual tiene un sello de corcho para evitar que el hilo se quemee y fugas de material. Una vez la fibra se introduce, con la ayuda de una pinza debe enhebrarse en el ojo del tornillo prisionero (2) que se encuentra al interior del cono. Se saca el hilo del cono y se

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

hace pasar por la boquilla desde la sección roscada (3) a la sección en punta (4), es en este paso es donde se escoge el diámetro que se desea extruir, se monta el cono en la cabeza de la extrusora con los 5 tornillos brístol, se rosca la boquilla en el cono, se sujeta el hilo del puller y se espera a que la maquina gane la temperatura de operación anteriormente descrita para iniciar la producción de filamento reforzado las partes numeradas previamente del 1 al 4 se pueden ver en la figura 18.

Figura 18.18

Esquema del recorrido del hilo de refuerzo en la boquilla



Nota: esta figura no es un plano es una imagen para mostrar de forma sencilla el proceso de enhebrado de la fibra de refuerzo

3.2.5.2.3. Puesta en marcha de la maquina

Una vez la maquina está limpia y enhebrada se encienden las resistencias con las temperaturas de izquierda a derecha en la siguiente configuración para el caso del PLA: T1=80°C, T2=140 °C y T3=150°C, este proceso de calentamiento dura aproximadamente 40 minutos, no basta con alcanzar las temperaturas mencionadas es necesario esperar que el material al interior

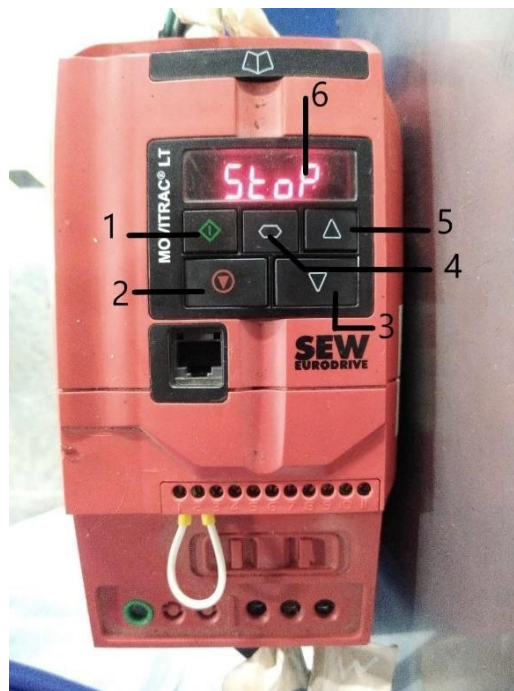
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

del barril funda, de lo contrario el motor no arrancara, la maquina no debe arrancarse con el barril vacío porque empezará a vibrar y a rozar el tornillo con el barril lo cual produce un chirrido.

Una vez que la maquina ha calentado el tiempo sugerido se vierten 125g de pellets en la tolva y se pulsa el botón verde del panel frontal el cual energiza el variador y luego el botón verde del variador. Para el caso de filamentos de PLA reforzados se obtuvieron los mejores resultados con la frecuencia entre 800 y 900 RPM en el variador, en la figura 19 se puede ver el variador y el panel de control de este.

Figura 19. 19

Panel de mando variador Movitrac LT



Nota: 1. Botón de puesta en marcha, 2 parar/reset, 3 disminuir, 4 seleccionar parámetro de control (Hz, RPM o A), 5 aumentar y 6 indicador.

El filamento comenzará a salir una vez la maquina gane presión, el filamento deberá salir con consistencia, no deberá ser líquido, pero tampoco debe corrugarse a la salida de la máquina, si el material se corruga formando un extruido pastoso es porque la maquina no ha calentado lo

suficiente y si el filamento presenta burbujas es porque se ha recalentado en ambos casos se deberá detener el motor (botón rojo del variador) y ajustar la temperatura del fluido.

3.2.5.2.4. Resultados esperados

Se debe obtener un hilo del material usado recubierto con PLA, ambos materiales deben ser concéntricos y el recubrimiento de PLA debe ser homogéneo de lo contrario es porque se está halando muy rápido el hilo de refuerzo. El color del recubrimiento no debe variar mucho respecto al de los pellets, si el material oscurece demasiado es porque se ha quemado o el barril esta sucio en ese caso debe vaciarse e introducir nuevo material. En la figura 20 se puede observar una muestra del material que se puede obtener.

Figura 20. 20

fotografía filamento reforzado PLA/fique



3.3. Fibras de refuerzo

Un punto crucial para este proyecto son las fibras de refuerzo, de las cuales es necesario tener un control de distintas variables, como lo eran el diámetro, número de fibras que componen el hilo, calidad del hilo y la influencia del proceso de mercerizado.

Las dos materias primas piña y fique siguen un proceso similar para pasar de la hoja al hilo, para el caso del fique se cortaron hojas con un largo de dos metros, se removieron los bordes

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

y se separaron en porciones más pequeñas, con un nudo suspendido en una columna se sujeta la porción de fique a través del nudo de la cuerda y se tira de la penca para despulpar separando la fibra, una vez separada se lava para someterse a un tratamiento con hidróxido de sodio, el tratamiento se denomina mercerizado, la solución tiene una concentración máxima del 2% P/V durante un tiempo máximo de 4 horas, este proceso se supone mejora la sinergia entre la fibra y la matriz (mejora que se evaluara mediante ensayos de tracción entre muestras mercerizadas y no mercerizadas), posterior a ello se lava la fibra con abundante agua destilada, la fibra es secada por 72 horas y se enrollan las fibras en un proceso de hilado con rueca la figura 21 contiene una secuencia del procedimiento antes descrito.

Figura 21.21

proceso de obtención del hilo de fibra natural desde la penca de fique.



Nota: de izquierda a derecha la primera imagen son las pencas de fique recolectadas con un largo aproximado de 2 m, luego se separan en pencas del mismo largo, pero más angostas, con una cuerda sujeta a

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

una columna se hace el nudo que se ve en la imagen, se pasa una a una las porciones de la penca y se tensiona el nudo, se tira la penca por un extremo de un solo tirón dejando la fibra color verde de la viñeta siguiente, un baño en NaOH para la mitad de las muestras, las demás solo se lavan con agua destilada, se obtendrá una fibra limpia la cual se hila.

3.3.1. Hilos obtenidos

Uno de los principales problemas fue conseguir los hilos, se fabricaron y se buscaron en el mercado, para el caso del fique es un hilo que se consigue con relativa facilidad, pero es muy grueso y basto; el hilo de fibra de piña no se consiguió. Se fabricaron algunas muestras de hilos, el hilo de piña fue el más difícil de fabricar porque la fibra que se consigue extraer es más corta, para el caso del fique era más sencillo y lo cual permitió hacer hilos con fibras mercerizadas y no mercerizadas.

Los hilos obtenidos y comprados se recubrieron usando los diámetros de boquillas de los cuales se disponían y hasta donde las condiciones de calibre de hilo y diámetro de boquilla lo permitía. Los filamentos obtenidos se mencionan en la tabla 8.

Tabla 8.

Diámetros de los hilos y filamentos usados y obtenidos.

Filamento	Diámetro [mm]	Desviación [+/- mm]
Fique mercerizado	0.49	0.02
Fique no mercerizado	0.29	0.02
Fique comercial	0.77	0.07
Piña	0.53	0.03
PLA 1	0.87	0.18
PLA 2*	4.36	1.38
PLA/Fique	0.60	0.05
PLA/fique comercial	1.32	0.20
PLA/Fique mercerizado	0.79	0.04
PLA/Piña	1.31	0.10

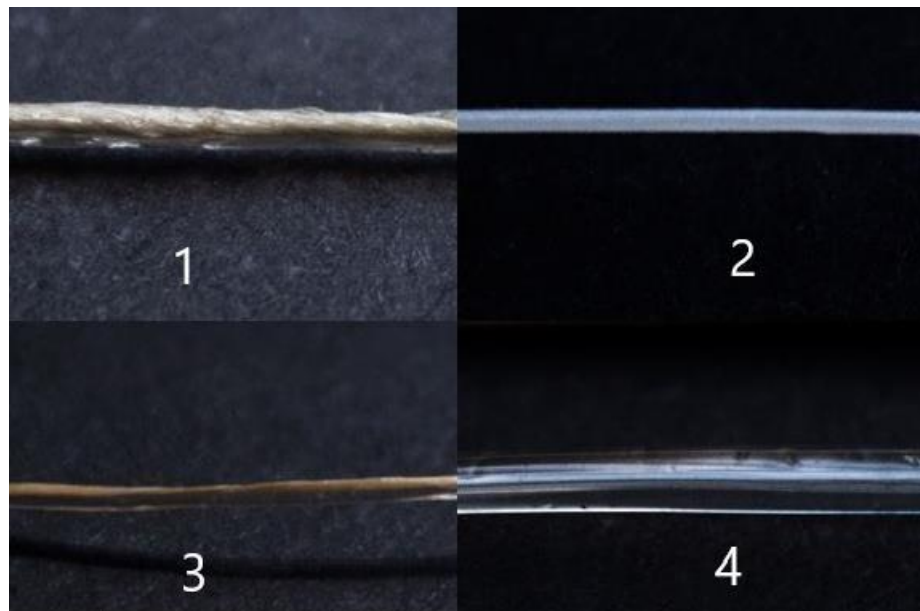
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Nota: el PLA 2 es un segundo tipo de PLA trabajado, de diferente proveedor y su probeta no es un filamento sino un perfil rectangular ergo sus dimensiones son mm^2 .

El proceso de mercerizado hace más fácil la limpieza de la fibra y conseguir hilos más delgados siendo el valor récord el de 0.29 mm usando 3 fibras de fique, este último hilo condujo al mejor filamento, pero es un desafío su producción pues cualquier grumo o nudo en el hilo atasca la boquilla de menor diámetro que fue la que se usó y obliga a bajar el cono y la boquilla y enhebrar de nuevo y en caliente siendo este un proceso tedioso. Algunos de los filamentos obtenidos se pueden ver en la figura 22.

Figura 22.22

Fotografía de los filamentos reforzados y puros.



Nota: 1 PLA reforzado con piña, 2 filamento de PLA puro del primer lote usado, 3 filamento de PLA reforzado con fique, hay dos más con esta misma combinación variando diámetro de filamento y 4 filamento de PLA puro de un segundo lote del cual se desconoce el almidón de que procede.

3.3.2. Ensayos mecánicos de fibras y filamentos.

Se realizaron ensayos de tracción según la norma ASTM D3822-07 para las muestras que se encuentran en la tabla 9, se hicieron 3 ensayos por cada tipo de muestra para un total de 27 ensayos usando la máquina Bionix Servohydraulic Test System.

Tabla 9.

muestras de hilos y fibras desarrollados

Filamento
Fique no mercerizado
Fique mercerizado
Fique comercial
Piña
PLA
PLA-fique no mercerizado
PLA-fique mercerizado
PLA-fique comercial
PLA-Piña

Las probetas se realizaron adaptadas a la norma ASTM D3822-07, debido a que no se poseían las mordazas comúnmente utilizadas en estos ensayos se elaboraron marcos de cartón paja de 25x4 cm con una abertura de 15x2 cm, en el cual la fibra estará pegada de forma centrada a los extremos del marco (siendo una adaptación que cumple con la norma) como se muestra en la figura 23.

Figura 23.23

Probetas ensayo de tracción



El montaje de las probetas se hizo colocando el marco de cartón paja de forma vertical en las mordazas de la máquina de ensayos a una distancia de 225 mm entre estas de tal forma que la probeta quede alineada con las marcas de ajuste que traen las mordazas, tal como lo dice la norma, posterior a esto se cortaran los laterales de la probeta de cartón paja para que estos no afecten el ensayo y finalmente se empezará la prueba con una velocidad de 10 mm/min hasta que la fibra se termine rompiendo obteniendo así las propiedades de tracción de las fibras. El montaje de las probetas se puede ver en la figura 24.

Figura 24.24

Montaje de las probetas en la máquina de ensayos



3.3.3. Resultados de los ensayos

Los ensayos buscan determinar las propiedades de módulo de elasticidad y esfuerzo máximo a la rotura, así como determinar la variación en estas propiedades cuando se modifica el tipo de fibra y cuando se modifica la fracción volumétrica de fibra de refuerzo. En la figura 25 y 26 se muestran las curvas esfuerzo deformación para el fique no mercerizado y el cálculo de la regresión lineal para la determinación del esfuerzo máximo y el módulo de Young respectivamente.

Figura 25.25

Gráfica de fique no mercerizado muestra 1

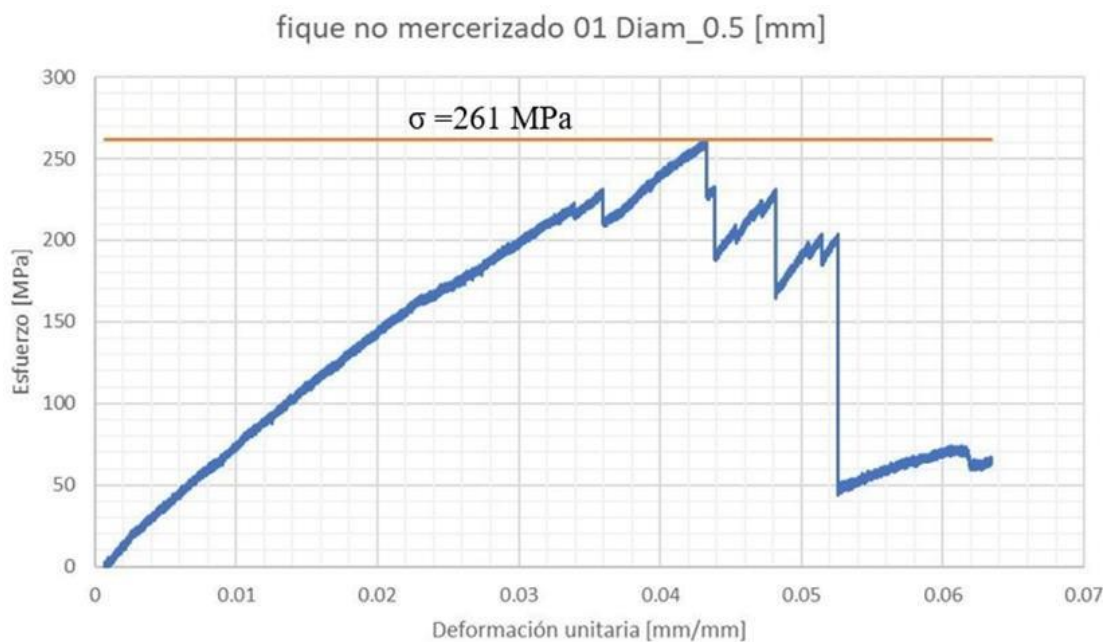
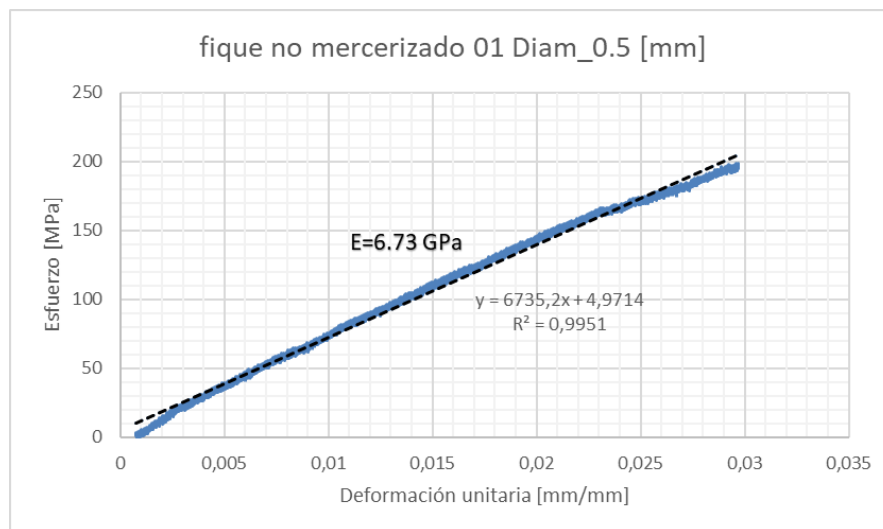


Figura 26.26

Regresión lineal fique o mercerizado muestra 1



En las tablas 6 y 7 se encuentran los valores obtenidos y los promedios de los ensayos realizados.

Tabla 10.

Resultados módulo de Young

Material	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	E prom
PLA	1.7	2.48	1.53	1.90
Fique no mercerizado	6.74	3.55	6.49	5.59
Fique mercerizado	2.54	3.16	1.99	2.56
Fique comercial	4.68	4.25	4.8	4.58
Piña	11.48	13.79	12.55	12.61
PLA/Fique no mercerizado	5.12	5.78	6.1	5.67
PLA/Fique mercerizado	5.46	2.22	3.76	3.81
PLA/Fique comercial	3.14	5.37	4.7	4.40
PLA/Piña	3.84	4.85	4.08	4.26

Tabla 11.

Resultados esfuerzo máximo

Material	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	σ prom
PLA	8.65	9.14	12	9.93
Fique no mercerizado	261	210	239	236.66
Fique mercerizado	144	100	73	105.67
Fique comercial	175	198	187	186.67
Piña	184	247	296	242.33
PLA/Fique no mercerizado	95	70	83	82.67
PLA/Fique mercerizado	93	68	70	77.00
PLA/Fique comercial	41.5	38.5	53	44.33
PLA/Piña	41	72	49	54.00

De las anteriores tablas y la siguiente grafica se puede observar que hay muestras con resultados muy parejos como lo fueron el esfuerzo máximo del fique no mercerizado, el fique comercial y el módulo de elasticidad del fique comercial, la fibra de piña y el filamento reforzado de fique no mercerizado.

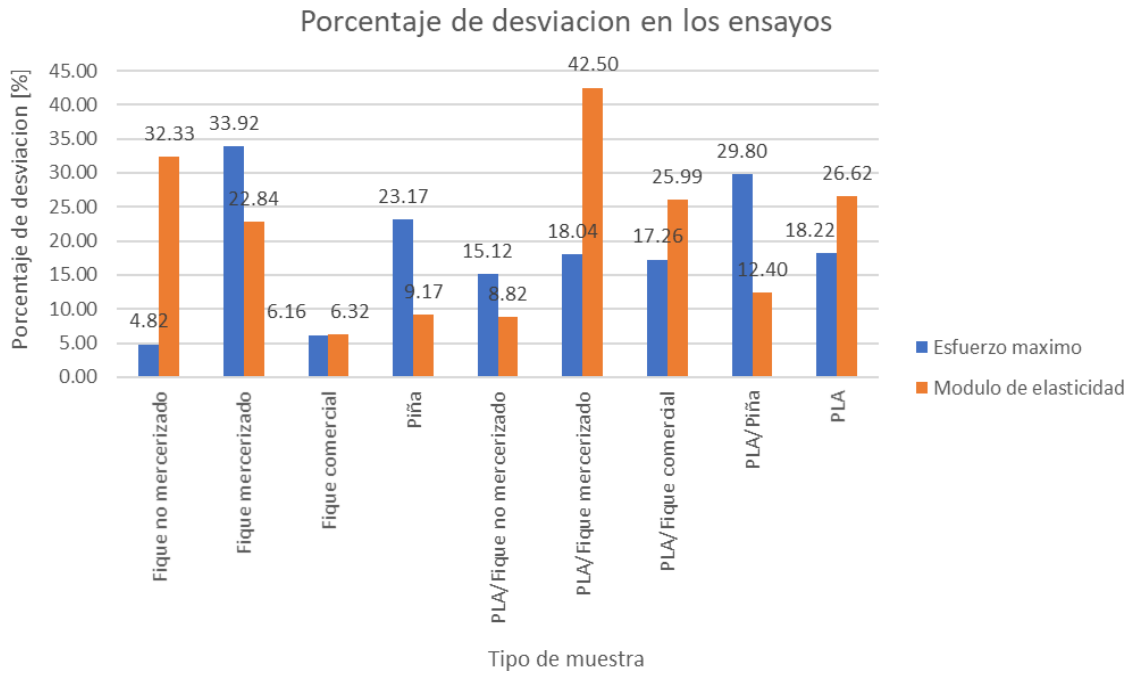
Por otro lado, los demás resultados no son tan parejos arrojando errores por encima del 8.8% de variación. De las principales causas de esta variación se encuentra la rotura de fibras de forma prematura como se evidencio con la muestra 2 de fique no mercerizado en la cual se observó de forma clara que reventó de manera anticipada una de las hebras que componía el hilo. Otra causa de la falta de uniformidad en los resultados es que el proceso de mercerizado pese a que ayudaba a lograr un hilo más delgado también lo fragilizaba y les quitaba homogeneidad a las propiedades por lo cual cualquier muestra mercerizada tuvo una mayor variación. Los hilos que se hicieron por proceso de hilado el cual en pocas palabras es enredar y torcer fibras tenían secciones muy irregulares prueba de ello es que estos hilos los de piña y fique comercial tenían la desviación

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

más alta con valores de +/-0.07 mm lo cual pudo haber causado que mientras algunas muestras tenían valores altos de modulo y resistencia otros tenían valores más bajos.

Figura 27.27

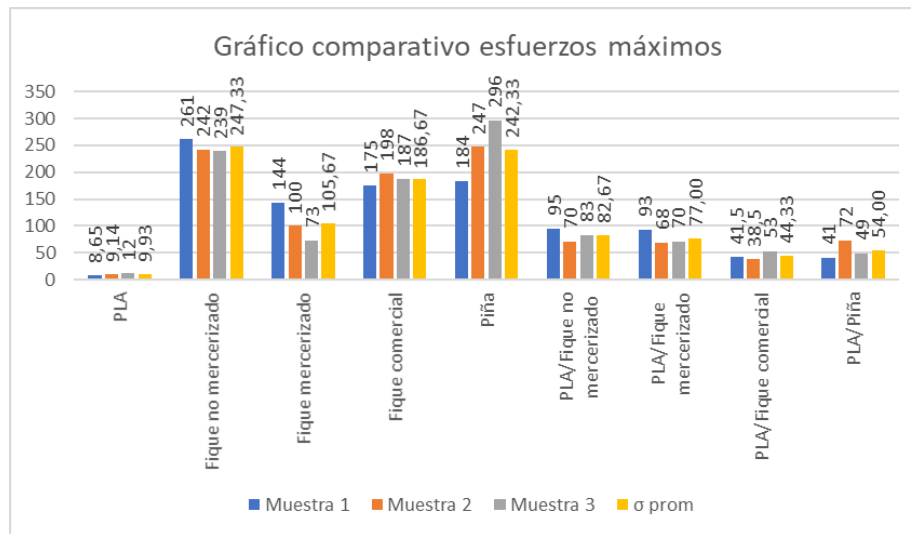
Grafica porcentaje de desviación estándar de las muestras



En las figuras 28 y 29 se encuentran los esfuerzos máximo y módulo de elasticidad respectivamente para cada una de las muestras y el promedio.

Figura 28.28

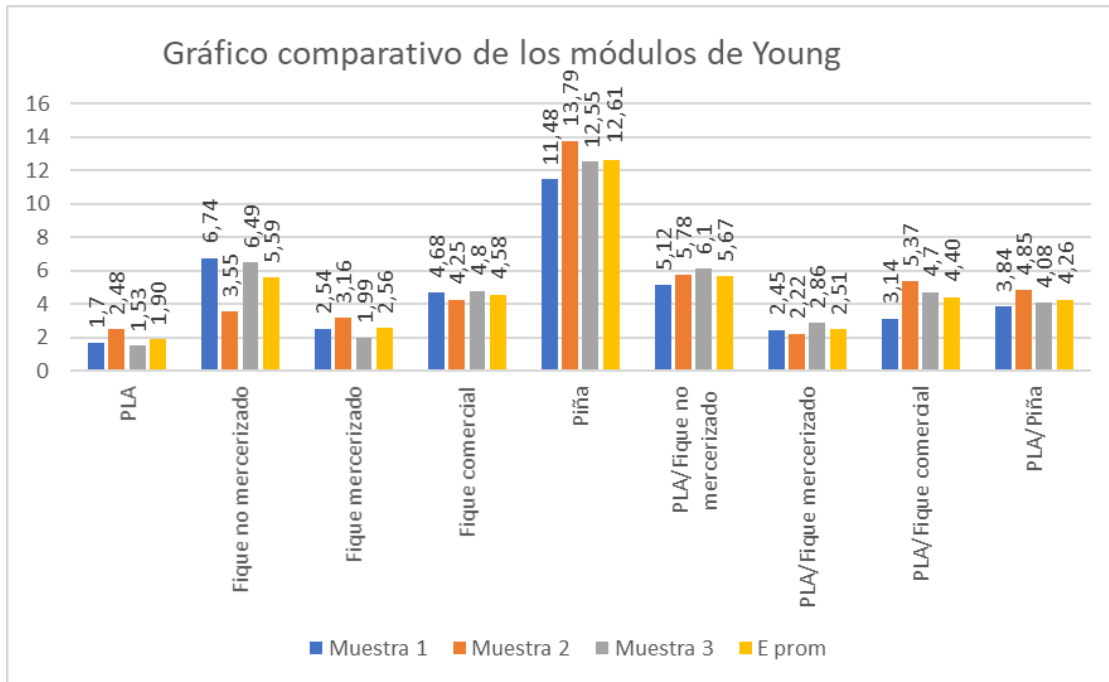
Esfuerzos máximos promedio de las muestras puras y de filamentos reforzados



De esta primera gráfica se puede apreciar que el PLA tiene una resistencia muy escasa, muy por debajo de los demás materiales e incluso más bajo que los valores consultados en la literatura, se cree que es por haber sido una de las primeras muestras obtenidas, seis meses antes de realizarse los ensayos y que pudo haber absorbido humedad afectando su desempeño. La piña arrojó resultados inesperados con una alta resistencia, similar a la del fique no mercerizado. El fique mercerizado perdió resistencia, pero el proceso de mercerizado permitía obtener hilos más finos. Por el lado de los filamentos reforzados se ve que, pese a que el hilo de fique perdió resistencia, pero el resultado final es bastante cercano al filamento reforzado no mercerizado. El filamento reforzado de fique comercial arrojó resultados por debajo de sus homólogos, posiblemente por sus dimensiones ya que al ser más gruesos perdían compatibilidad y se fragilizaban como ocurrió también con el filamento reforzado de piña el cual pese a tener la mayor resistencia tuvo las mayores pérdidas de resistencia y se concluye que la peor compatibilidad.

Figura 29.29

Módulos de elasticidad promedio de muestras puras y filamentos reforzados



Para esta propiedad se puede observar que el PLA sigue teniendo los valores más bajos pero esta vez no es tan reducida. Una vez más la piña tiene las propiedades más elevadas, siendo casi el doble de la media. El proceso de mercerizado redujo la elasticidad del hilo a la mitad y redujo la uniformidad de los datos. El hilo de fique comercial arrojó los resultados más parejos. En esta gráfica se logra ver que el proceso de mercerizado perjudicó el producto final restándole elasticidad, con lo cual se sugiere que de ser posible se use un método mecánico para la extracción de las fibras que ayude a prescindir del proceso de mercerizado consiguiendo la misma calidad de hilo. El filamento reforzado de piña obtuvo resultados similares a los del fique comercial a pesar de que tenía la mayor elasticidad, con esta última observación se anticipa que la fibra de piña fue la menos compatible para el desarrollo de los filamentos reforzados.

El código EES que se encuentra en el apéndice B tiene unos estimados teóricos de que valores se debieron obtener, se seleccionó el valor más cercano para el caso del esfuerzo máximo

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

el cual describe el tipo de interacción que tiene el refuerzo y la matriz. Estas comparaciones se pueden ver en la tabla 12.

Tabla 12.

Comparación de valores estimados contra valores obtenidos en los ensayos.

Muestra	E_ensayos	E_teorico 2	σ _ensayos	σ _teorico *	σ _teorico **	σ _teorico ***
PLA/Fique no mercerizado	5.67	4.75	82.67	<u>93.99</u>	100.42	137.39
PLA/Fique mercerizado	2.51	3.36	77.00	24.30	33.13	<u>70.50</u>
PLA/Fique comercial	4.40	3.93	44.33	<u>63.47</u>	70.94	109.67
PLA/Piña	4.26	5.04	54.00	38.77	<u>43.26</u>	97.57

Nota: los valores de esfuerzo con asteriscos corresponden a: * caso donde rompe primero la

matriz, ** caso donde rompe primero la fibra, *** donde se asume como un sistema de resortes en paralelo y los valores resaltados son los valores más cercanos al obtenido en los ensayos.

Tabla 13.

Porcentaje de error entre estimaciones y resultados de los ensayos

Muestra	%Error Esfuerzo Max	% Error Modulo de Young
PLA/Fique no mercerizado	12.04	19.48
PLA/Fique mercerizado	9.21	13.37
PLA/Fique comercial	30.15	11.87
PLA/Piña	24.84	15.50

De la tabla 12 y 13 se puede ver que los resultados más lejanos los presentan la piña y el fique comercial datos que respaldan la hipótesis de que es la piña es la fibra menos compatible y que el problema puede radicar en el diámetro del hilo de refuerzo, donde lo ideal es que el refuerzo sea un hilo fino y el recubrimiento delgado. El filamento con los resultados más cercanos es el de

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

fibra de fique mercerizada, pero es el filamento de fibra de fique no mercerizado quien tiene las mejores propiedades de elasticidad y resistencia.

Se hicieron otros cálculos para determinar el impacto de la incertidumbre en la determinación del área, usando curvas fuerza vs deformación para el caso de la muestra con mayor porcentaje de error, el filamento reforzado mercerizado, se calculó la constante de rigidez K:

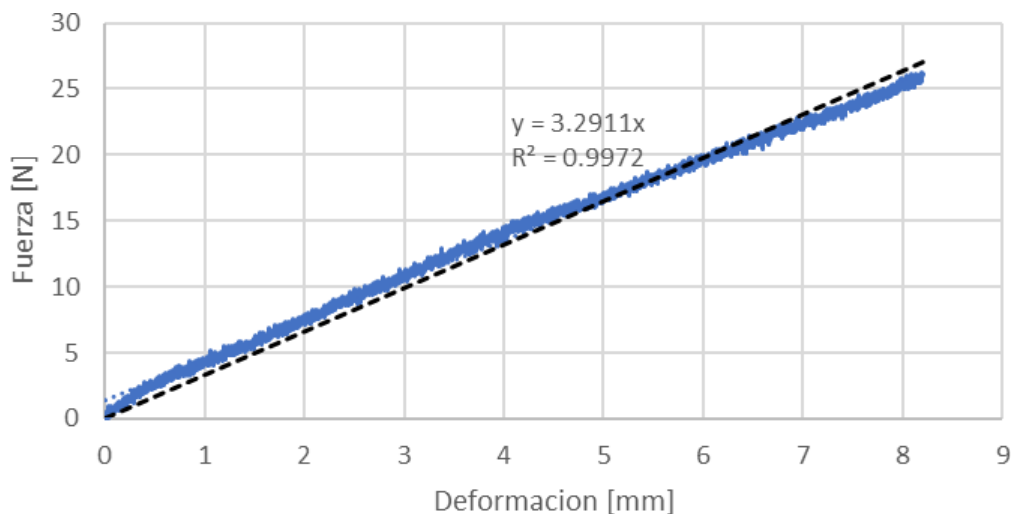
$$K_{plafique} = 0.62 * 4.25 + (1 - 0.62) * 3.29$$

$$K_{plafique3} = 3.89$$

La constante de rigidez se halla en los ensayos fue de 5 y la calculada de 3.78 lo cual es una diferencia del 22.2 %, este porcentaje de error no es menor al que tienen ambas propiedades evaluadas lo cual ayuda a descartar la idea de que la medición del área hubiese sido un factor importante en la determinación de las propiedades. Las constantes K se sacaron de la pendiente de la curva Fuerza vs deformación una de las gráficas se ve en la figura 30 y las demás se encuentran en el apéndice B.

Figura 30.30

grafica fuerza deformación fique mercerizado



3.3.4. Caracterización

Los mejores resultados se obtuvieron con las temperaturas de T1=80° C, T2=150° C y T3=160° C más allá de estas temperaturas en cualquiera de estas zonas hace que el PLA pierda consistencia y que el hilo se llene de burbujas, también es un factor crucial la fabricación de filamentos finos, los filamentos gruesos demostraron tener las peores propiedades.

El mejor filamento resulto ser el de fibra de fique no mercerizada, con las mejores propiedades, aunque el filamento de fique mercerizado tiene resultados muy similares y el proceso de mercerizado facilita la limpieza de la fibra, si es posible mediante métodos mecánicos obtener la misma fibra es mejor no realizar el proceso de mercerizado.

La tabla 14 tiene una recopilación de las propiedades obtenidas, las esperadas, la boquilla usada y si se mercerizo o no la fibra de refuerzo.

Tabla 14.

Comparación de resultados obtenidos vs esperados

Filamento			Unidad			Unidad
 PLA/fique 1	D_ext	0,79	mm	E_teorico	3,36	Gpa
	D_fib	0,49	mm	E_exp	2,51	
	fracc_PLA	0,62	%	σ_{teo}	70,5	MPa
	boquilla M mercerizado si	NA		σ_{exp}	77	
 PLA/fique 2	D_ext	0,60	mm	E_teorico	4,75	Gpa
	D_fib	0,29	mm	E_exp	5,67	
	fracc_PLA	0,77	%	σ_{teo}	93,99	MPa
	boquilla S mercerizado no	NA		σ_{exp}	82,67	
 PLA/Fique 3	D_ext	1,32	mm	E_teorico	3,93	GPa
	D_fib	0,77	mm	E_exp	4,4	
	fracc_PLA	0,66	%	σ_{teo}	63,47	MPa
	boquilla M NA	NA		σ_{exp}	44,33	
 PLA/Piña	D_ext	1,31	mm	E_teorico	5,04	GPa
	D_fib	0,53	mm	E_exp	4,26	
	fracc_PLA	0,84	%	σ_{teo}	43,26	MPa
	boquilla L mercerizado no	NA		σ_{exp}	54,67	

Nota: a los filamentos se les dieron nombres más sencillos y esta tabla resume los datos calculados inicialmente y los ensayados, así como la boquilla que se usó para su producción.

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

La película de PLA no debe ser muy gruesa por ello se sugiere que el tamaño de la boquilla sea cercano al diámetro de la fibra, para ello las boquillas se clasificaron como S, M y L, siendo los tamaños de 0.5 mm, 1 mm y 1.5 mm respectivamente, en la figura 31 se ven las boquillas de las cuales se dispone.

Figura 31.31

Boquillas: S, M y L



Inicialmente se había comentado que había más de un modo de fractura: el primero en el cual la matriz fracturaba de primero y el esfuerzo era soportado únicamente por el refuerzo, el segundo aquel donde el refuerzo quiebra primero y el esfuerzo es una suma entre la resistencia del refuerzo con un aporte de la matriz hasta el momento en que fractura el refuerzo y finalmente una tercera donde los dos materiales aportan resistencia proporcional a la fracción volumétrica de cada componente, arrojando como resultado que si es una fibra elástica fallara como en el primer caso recién descrito, si el refuerzo tiene una elasticidad cercana a la matriz el resultado será el descrito por el caso 2 y si son matriz y refuerzo muy cercanos o el refuerzo menos elástico el resultado será el descrito por el último caso.

4. Conclusiones

Se concluyo que, aunque la maquina funciona, carece de potencia, los cálculos indican que es necesaria una potencia de 4.4 HP y se dispone de un motor de 2.4 HP, las maquinas disponibles en la industria para la fabricación de pellets y filamento de impresión 3D manejan en promedio motores de 10 HP o más, por esta razón muchas veces la maquina se frenó cuando el tornillo se llenaba lo cual obligo a operar la maquina con dosis máximas de 125 g depositados de a poco en la tolva.

La unidad puller no era la adecuada para la fabricación de filamento reforzado porque la velocidad mínima estaba por encima de la requerida para conformar un hilo de calidad lo cual causaba burbujas y que se desprendiera el PLA.

Las piezas que se mandaron manufacturar sirvieron al propósito para el cual se diseñaron, pero es necesario trabajar mejor las tolerancias para corregir fugas y alcanzar mejores niveles de presión porque cuando el cono se llenaba el PLA escapaba por el orificio por donde entraba el filamento de refuerzo, es necesario además tener un sistema de monitoreo de presión porque es una variable muy útil para conocer el estado de la maquina y del proceso. Es necesario montar un sistema de control de temperatura para la resistencia que se agregó en la boquilla para evitar que el PLA se queme en la boquilla, el cono de extrusión. De remanufacturarse es recomendable que se haga en acero inoxidable porque el prototipo actual se oxido rápidamente, no se manufacturo en acero inoxidable martensítico por los elevados costos y también es recomendable disminuir el largo del cono para evitar que se enfríe el polímero y obligue a parar la producción.

Se consiguieron mejores resultados con filamentos delgados, se dispone de tres boquillas y necesario seleccionarlas acorde al diámetro del hilo de refuerzo, entre más similares son los diámetros se obtienen filamentos mejor conformados, uniformes y manejables.

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

A pesar de que la fibra de piña tenía propiedades más altas que las del fique, la fibra reforzada termino teniendo propiedades inferiores a las reforzadas con fique demostrando así que hay una menor compatibilidad entre la piña-PLA y una mejor para el fique, por lo cual el fique es una mejor para usar como fibra de refuerzo.

El proceso de mercerizado ayuda mucho en extracción de la fibra, pero reduce las propiedades del hilo de refuerzo, afecta principalmente la elasticidad final del filamento reforzado, pero no tanto la resistencia pues el material compuesto final “filamento reforzado con fique bien sea mercerizado o no” tienen una resistencia muy similar. El proceso de extracción de la fibra con métodos netamente mecánicos desperdicia mucha más fibra y también se corre el riesgo de usar fibras defectuosas (maltratadas), de pulirse la técnica se podría prescindir del proceso de mercerizado.

El filamento de fique comercial es fácil de conseguir contrario al de la piña que nunca se encontró, se desconoce si durante la fabricación del hilo se mercerizo o no. La resistencia del hilo de fique comercial era inferior, pero ello se debe al proceso de manufactura del hilo que se hace por hilado cuando las otras muestras se hicieron con fibras continuas enrolladas. El fique comercial era muy irregular y presentaba muchas hebras sueltas que se atascaban en la boquilla reventando el hilo o afectando también el recubrimiento.

De los filamentos desarrollados se destaca como el mejor el filamento de PLA reforzado con fique no mercerizado con diámetro de fibra de 0.29 mm equivalente a entre 3 a 4 fibras de fique manufacturado en la boquilla S con un diámetro final de 0.6 mm, este filamento arrojo mejoras respecto al PLA puro y una reducción en el consumo de PLA del 38 %.

es imperativa la obtención de un hilo de refuerzo de gran calidad, que no presente hebras sueltas, sin nudos y que sea fino (delgado) porque se apreció que los mejores resultados se obtienen

para filamentos delgados es decir los próximos a un diámetro final de 0.3 mm y usando la boquilla S. Si se pone como objetivo que el filamento sean para impresión 3D es imperativo que sea fino y regular.

5. Comentarios y recomendaciones

los objetivos no contemplaban el uso del material en impresión 3D pero es casi imposible no asociar un filamento de PLA reforzado con usos en impresión 3D, idea que no es descabellada pero si requiere más investigación y algunas modificación al proceso básico de deposición de material fundido pero de lograrse sería un gran avance dado que se usaría materiales 100% biodegradables (tanto matriz como refuerzo), más resistentes y disminuyendo el consumo de PLA en un 38% recordando que el ácido poli láctico demanda el sacrificio de recursos que pueden ser destinados a la alimentación.

Finalmente, a modo de recomendación se sugiere la experimentación con hilos de algodón, un material abundante con suficiente desarrollo tecnológico y que también es biodegradable para superar la actual dificultad de obtener los hilos.

6. Referencias Bibliográficas

(S.F.).

ASKELAND, D. R. (S.F.). CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES. INTERNATIONAL THOMSON.

C., L. (JULIO DE 23 DE 2019). 3D NATIVES. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.3DNATIVES.COM/ES/ECOLOGICO- REALMENTE-FILAMENTO-PLA-230720192/#!](https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!)

FERNÁNDEZ, B. M. (2009). *ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LA FIBRA DE COCO COMO REFUERZO DE MATERIAL COMPUESTO MATRIZ POLIMÉRICA (MCMP)*. UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS.

FERNANDEZ, B. M. (2009). *ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAICAS DE LA FIBRA DE COCO COMO REFUERZO DE MATERIAL COMPUESTO EN MATRIZ POLIMERICA*. UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU"DE LAS VILLAS.

GARCIA, L. A. (2014). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE FIBRA DE FIQUE Y FIBRAS SINTÉTICAS*. BARRANQUILLA: UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE.

HOWARD, L. C. (23 DE JULIO DE 2019). OBTENIDO DE 3D NATIVES: [HTTPS://WWW.3DNATIVES.COM/ES/ECOLOGICO-REALMENTE-FILAMENTO-PLA-230720192/#!](https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!)

JERONIMO, B. M. (30 DE ENERO DE 2012). CÁLCULO CON MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA CONTINUA Y ALINEADA | 22/22 | UPV. VALENCIA, ESPAÑA.

KASIM, A. S. (2015). EFECTO DE LA CARGA DE FIBRA DE HOJA DE PIÑA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE HOJA DE PIÑA - COMPUESTO DE POLIPROPILENO. *JURNAL TEKNOLOGI* , 77 (21).

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

LOPEZ, A. I. (16 DE ENERO DE 2021). *NATIONAL GEOGRAPHIC EN ESPAÑOL*.
OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.NGENESPANOL.COM/ECOLOGIA/ESTE-ES-EL-
ARBOL-MAS-ALTO-DEL-MUNDO-Y-SU-HOGAR- SE-MANTIENE-EN-SECRETO-
PARA-EVITAR-SU-DESTRUCCION/](https://www.ngenespanol.com/ecologia/este-es-el-arbol-mas-alto-del-mundo-y-su-hogar-se-mantiene-en-secreto-para-evitar-su-destruccion/)

LOZANO, J. (1999). *TEJIDOS SIN TEJER*. OBTENIDO DE
CANALES.LAVERDAD.ES/CIENCIAYSALUD/7_2_15.HTML.) MARÍA REBECA

HODGSON ROJAS, K.-T. L. (2018). *FIBRA DE LA HOJA DE PIÑA, OBTENCIÓN Y
APLICACIONES*.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA.

MARIO FERNANDO MUÑOZ-VELEZ, M. A.-S.-H. (2014). FIBRAS DE FIQUE UNA
ALTERNATIVA PARA EL REFORZAMIENTO DE PLÁSTICOS. INFLUENCIA DE
LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL. *BIOTECNOLOGÍA EN EL SECTOR
AGROPECUARIO Y AGROINDUSTRIAL*, 67.

MINISTERIO DE AGRICULTURA DE COLOMBIA, FENALFIQUE. (2019). CARTILLA

TECNICA DE CULTIVO DE FIQUE. 70EI.SAVGORODNY, V. K. (1978). *TRANSFORMACION
DE PLASTICOS*. BARCELONA: GUSTAVO GILI S.A.

7. Apéndices

Apéndice A

Código EES “cálculos de motor de extrusora”.

$$Q = \alpha \cdot n - \beta \cdot \frac{\Delta p}{\mu_{efec}} - \gamma \cdot \frac{\Delta p}{\mu_{efec}}$$

$$Pot = \pi^3 \cdot D^3 \cdot n^2 \cdot L \cdot \frac{\mu_{efec}}{h} + \alpha \cdot \frac{\Delta p}{\cos^2[\phi]} + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n^2 \cdot e \cdot L \cdot \mu_{efec}}{\zeta \cdot \tan[\phi]}$$

donde alpha corresponde al coeficiente de flujo de arrastre

$$\alpha = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot h \cdot \left[\frac{t}{m} - e \right] \cdot \cos^2[\phi]}{2}$$

Beta es el de flujo de presion

$$\beta = \frac{m \cdot h^3 \cdot \left[\frac{t}{m} - e \right] \cdot \sin[\phi] \cdot \cos^2[\phi]}{12 \cdot L}$$

gamma es el coeficiente de flujo de filtraciones

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot \zeta^3 \cdot \tan[\phi]}{10 \cdot e \cdot L}$$

PARAMETROS PARA EL CALCULO

$$n = 10 \quad n = \text{velocidad de rotacion en RPM}$$

$$\mu_{efec} = 70 \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

$$m = 1 \quad m = \text{numero de canales en el husillo 1 para el caso de estudio}$$

$$D = \frac{38}{1000} \quad [\text{m}] \quad D = \text{diametro del husillo}$$

$$h = \frac{5}{1000} \quad [\text{m}] \quad h = \text{profundidad del canal}$$

$$t = \frac{20}{1000} \quad t = \text{paso}$$

$$e = \frac{5}{1000} \quad e = \text{espesor de la helice}$$

$$\phi = 20 \quad \phi = \text{angulo de la helice}$$

$$L = 0.8 \quad L = \text{longitud del husillo}$$

$$\zeta = \frac{1}{1000} \quad \zeta = \text{zeta=holgura entre el barril y el husillo}$$

$$Q = 2 \cdot \frac{1000}{3600 \cdot 1.24 \cdot 1000000 \cdot 1} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$P_{atmosferas} = \Delta p \cdot 9.8692 \cdot 10^{-6}$$

Apéndice B

Código EES predicción de propiedades por ley de mezclas

$$P_c = P_m \cdot V_m + P_r \cdot V_r$$

Donde :

P = Propiedad.

V = fracción volumétrica.

Y los subíndices:

c = compuesto

m = matriz

r = refuerzo

la propiedad densidad siempre cumple la ley de mezclas y quedaría de la forma:

$$\rho_{c} = \rho_{m} \cdot V_m + \rho_{r} \cdot V_r$$

Módulo de elasticidad 'E' del material compuesto 'Ec', se asume isotensión y esfuerzo paralelo a fibra

Ecuacion tipo ley de mezclas --- $E_C = E_m \cdot V_m + E_r \cdot V_r$

$$E_{C, \text{piña}} = E_{\text{PLA}} \cdot V_D + E_{\text{piña}} \cdot V_{\text{piña}}$$

$$E_{C, \text{fique,1}} = E_{\text{PLA}} \cdot V_{D1} + E_{\text{fique}} \cdot V_{\text{fique,1}}$$

$$E_{C, \text{fique,2}} = E_{\text{PLA}} \cdot V_{D2} + E_{\text{fique}} \cdot V_{\text{fique,2}}$$

$$E_{C, \text{fique,3}} = E_{\text{PLA}} \cdot V_{D3} + E_{\text{fique}} \cdot V_{\text{fique,3}}$$

Resistencia a la tracción ' $\sigma_{\text{caso 1 tipo de fibra}}$ ' asumiendo que fractura primero el refuerzo

$$\sigma_{c1, \text{piña,1}} = \sigma_{\text{max, piña}} \cdot V_{\text{piña}} + \sigma_{\text{prima, m, piña}} \cdot V_D$$

$$\sigma_{c1, \text{fique,1}} = \sigma_{\text{max, fique}} \cdot V_{\text{fique,1}} + \sigma_{\text{prima, m, fique}} \cdot V_{D1}$$

$$\sigma_{c1, \text{fique,2}} = \sigma_{\text{max, fique}} \cdot V_{\text{fique,2}} + \sigma_{\text{prima, m, fique}} \cdot V_{D2}$$

$$\sigma_{c1, \text{fique,3}} = \sigma_{\text{max, fique}} \cdot V_{\text{fique,1}} + \sigma_{\text{prima, m, fique}} \cdot V_{D1}$$

$\sigma_{\text{prima, m}}$ es la resistencia de la matriz cuando rompe el refuerzo y esta dada por:

$$\sigma_{\text{prima, m, fique}} = \frac{\sigma_{\text{max, fique}}}{E_{\text{fique}} \cdot E_{\text{PLA}}}$$

$$\sigma_{\text{prima, m, piña}} = \frac{\sigma_{\text{max, piña}}}{E_{\text{piña}} \cdot E_{\text{PLA}}}$$

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Resistencia a la tracción ' $\sigma_{\text{caso } 2_{\text{tipo}}}$ de fibra' asumiendo que fractura primero la matriz

$$\sigma_{c2, \text{fique}, 1} = \sigma_{\text{max}, \text{fique}} \cdot V_{\text{fique}, 1}$$

$$\sigma_{c2, \text{fique}, 2} = \sigma_{\text{max}, \text{fique}} \cdot V_{\text{fique}, 2}$$

$$\sigma_{c2, \text{fique}, 3} = \sigma_{\text{max}, \text{fique}} \cdot V_{\text{fique}, 3}$$

$$\sigma_{c2, \text{piña}} = \sigma_{\text{max}, \text{piña}} \cdot V_{\text{piña}}$$

$$V_D = \frac{D^2 - D_{\text{piña}}^2}{D^2}$$

$$V_{D1} = \frac{D1^2 - D_{\text{fique}, 1}^2}{D1^2}$$

$$V_{D2} = \frac{D2^2 - D_{\text{fique}, 2}^2}{D2^2}$$

$$V_{D3} = \frac{D3^2 - D_{\text{fique}, 3}^2}{D3^2}$$

$$V_{\text{fique}, 1} = \frac{D_{\text{fique}, 1}^2}{D1^2}$$

$$V_{\text{fique}, 2} = \frac{D_{\text{fique}, 2}^2}{D2^2}$$

$$V_{\text{fique}, 3} = \frac{D_{\text{fique}, 3}^2}{D3^2}$$

$$V_{\text{piña}} = \frac{D_{\text{piña}}^2}{D^2}$$

DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

declaracion de propiedades

$$\sigma_{\max, \text{fique}} = 237 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\max, \text{piña}} = 170 \text{ [MPa]}$$

tambien hay datos que indican que puede llegar a 290 MPa y 420 mercerizada

$$\sigma_{\max, \text{PLA}} = 47 \text{ [MPa]} \quad \text{Hay datos que indica que puede llegar a 70 MPA}$$

$$E_{\text{fique}} = 8.01 \text{ [GPa]}$$

$$E_{\text{piña}} = 34 \text{ [GPa]} \quad \text{valor maximo 82 GPa}$$

$$E_{\text{PLA}} = 3.3 \text{ [GPa]} \quad \text{valor maximo}$$

$$D = \frac{1.31}{1000}$$

$$D1 = \frac{0.79}{1000} \text{ [m]}$$

$$D2 = \frac{0.6}{1000} \text{ [m]}$$

$$D3 = \frac{1.32}{1000} \text{ [m]}$$

$$D_{\text{fique,1}} = \frac{0.49}{1000} \text{ [m]}$$

$$D_{\text{fique,2}} = \frac{0.29}{1000} \text{ [m]}$$

$$D_{\text{fique,3}} = \frac{0.77}{1000} \text{ [m]}$$

$$D_{\text{piña}} = \frac{0.53}{1000}$$

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$$D = 0.00131 \text{ [m]}$$

$$D3 = 0.00132 \text{ [m]}$$

$$D_{\text{fique,3}} = 0.00077 \text{ [m]}$$

$$E_{\text{c, fique,2}} = 4.4 \text{ [GPa]}$$

$$E_{\text{fique}} = 8.01 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{c1, fique,1}} = 96.69 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{c1, piña,1}} = 29.09$$

$$\sigma_{\text{c2, fique,3}} = 80.65 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\max, \text{piña}} = 170 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{prima, m, piña}} = 1.515 \text{ [MPa]}$$

$$V_{D2} = 0.7664$$

$$V_{\text{fique,2}} = 0.2336 \text{ [.]}$$

$$D1 = 0.00079 \text{ [m]}$$

$$D_{\text{fique,1}} = 0.00049 \text{ [m]}$$

$$D_{\text{piña}} = 0.00053$$

$$E_{\text{c, fique,3}} = 4.903 \text{ [GPa]}$$

$$E_{\text{piña}} = 34 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{c1, fique,2}} = 62.24 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{c2, fique,1}} = 91.18 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{c2, piña}} = 27.83 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\max, \text{PLA}} = 47 \text{ [MPa]}$$

$$V_D = 0.8363$$

$$V_{D3} = 0.6597$$

$$V_{\text{fique,3}} = 0.3403 \text{ [.]}$$

$$D2 = 0.0006 \text{ [m]}$$

$$D_{\text{fique,2}} = 0.00029 \text{ [m]}$$

$$E_{\text{c, fique,1}} = 5.112 \text{ [GPa]}$$

$$E_{\text{c, piña}} = 8.325 \text{ [GPa]}$$

$$E_{\text{PLA}} = 3.3 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{c1, fique,3}} = 96.69 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{c2, fique,2}} = 55.37 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\max, \text{fique}} = 237 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{prima, m, fique}} = 8.966 \text{ [MPa]}$$

$$V_{D1} = 0.6153$$

$$V_{\text{fique,1}} = 0.3847 \text{ [.]}$$

$$V_{\text{piña}} = 0.1637 \text{ [.]}$$

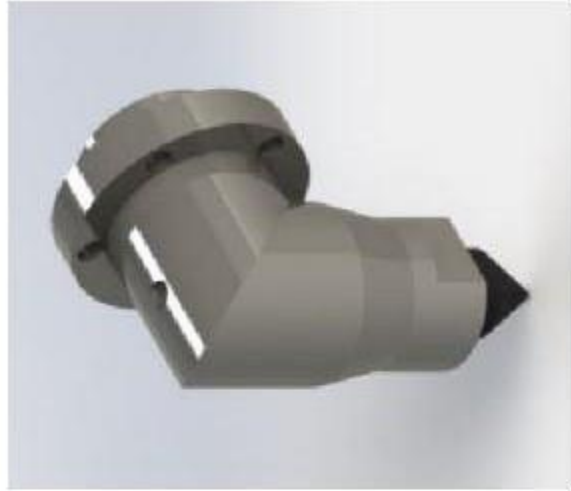
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

Apéndice C

Planos alternativos de manufactura 1 y 2



ALTERNATIVA
1

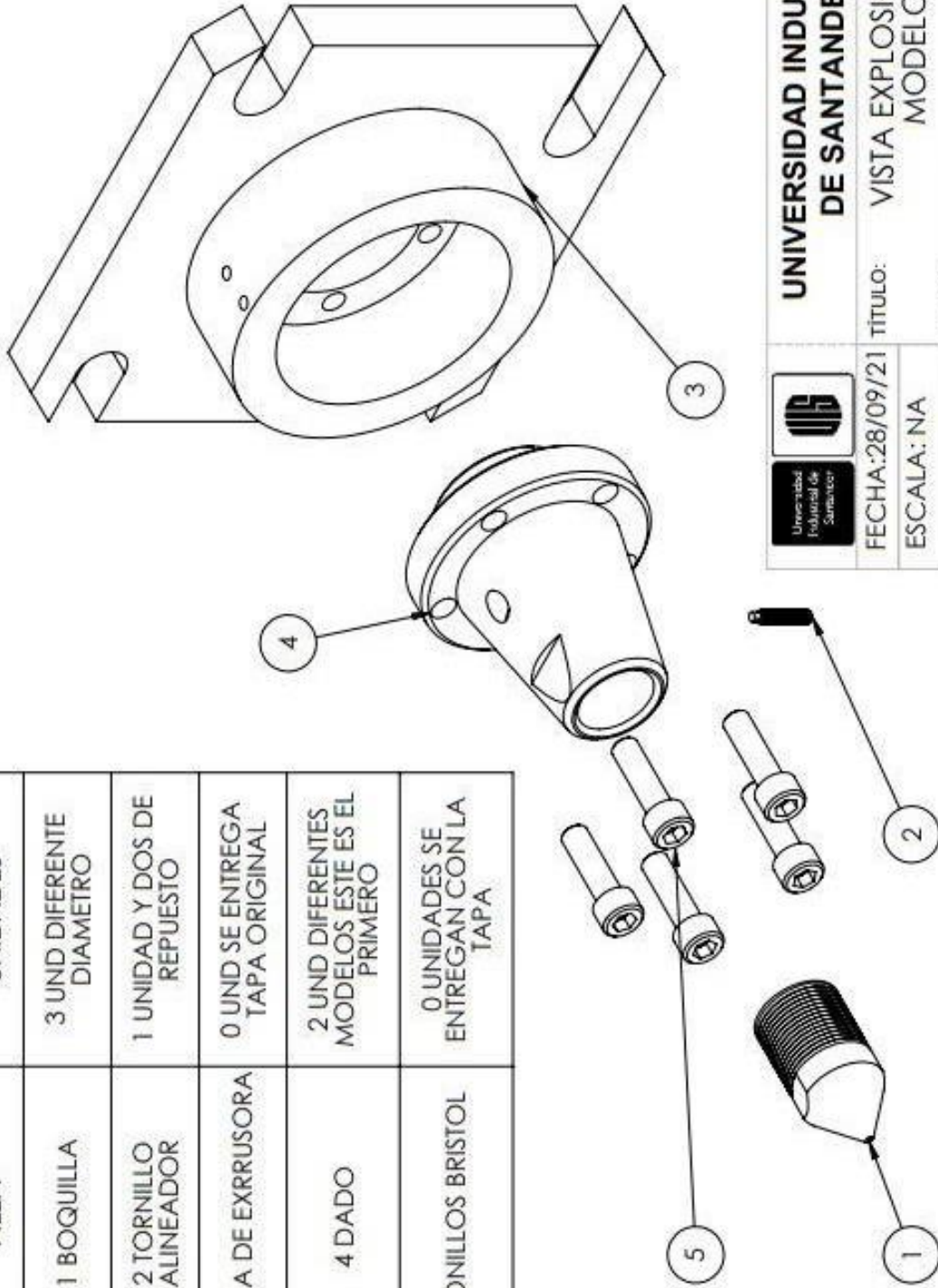


ALTERNATIVA
2



	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FECHA: 29/09/21	TÍTULO: RENDERIZADO DE ALTERNATIVAS 1 Y 2
ESCALA: NA	AUTOR: LIBARDO PINILLA RODRÍGUEZ
UNIDADES: NA	REVISOR: HOJA 1
A4	

PIEZA	UNIDADES
1 BOQUILLA	3 UND DIFERENTE DIAMETRO
2 TORNILLO ALINEADOR	1 UNIDAD Y DOS DE REPUESTO
3 TAPA DE EXRRUSORA	0 UND SE ENTREGA TAPA ORIGINAL
4 DADO	2 UND DIFERENTES MODELOS ESTE ES EL PRIMERO
5 TORNILLOS BRISTOL	0 UNIDADES SE ENTREGAN CON LA TAPA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 28/09/21

TÍTULO: VISTA EXPLOSIONADA
MODELO 1

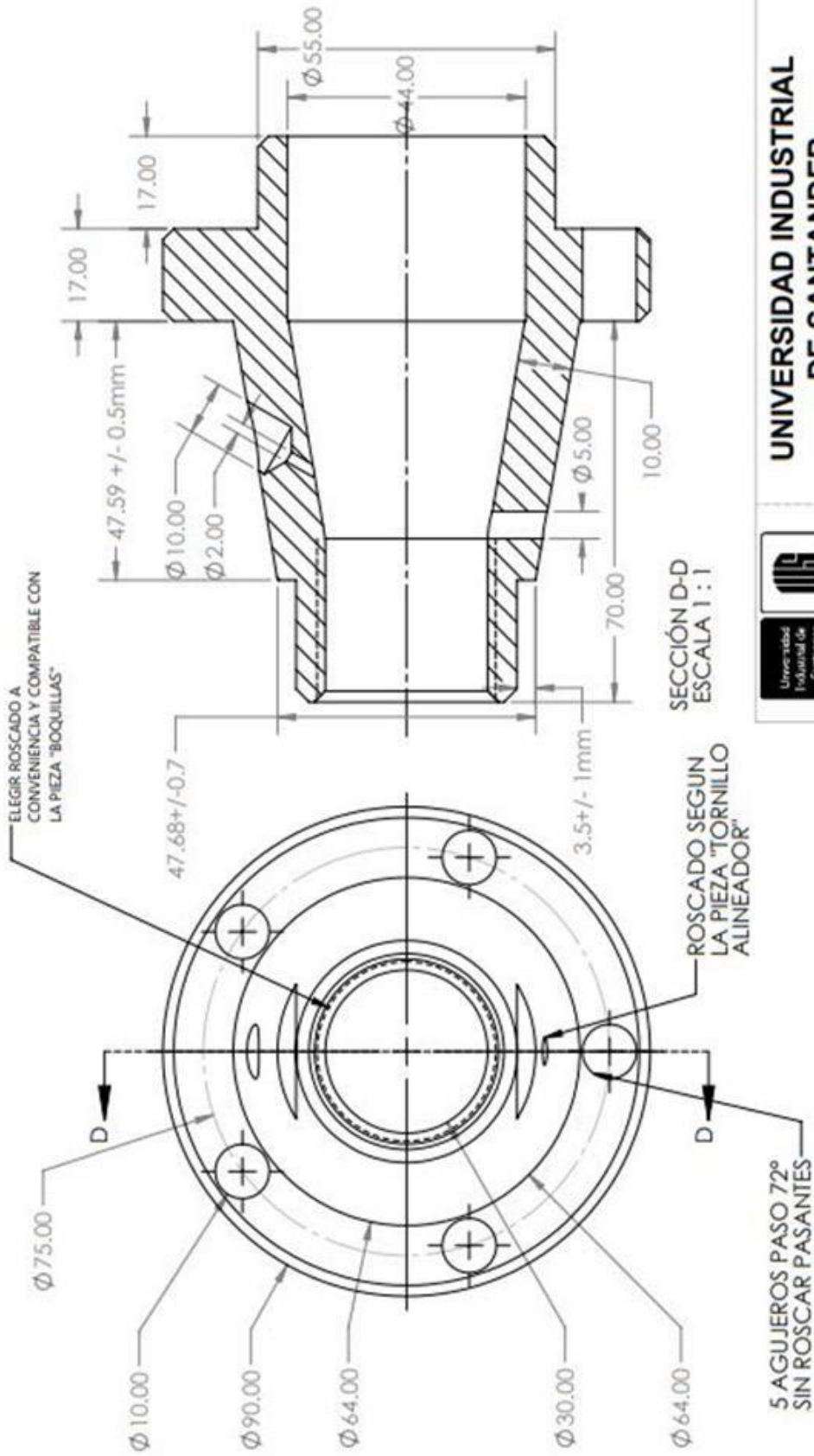
ESCALA: NA

UNIDADES: NA

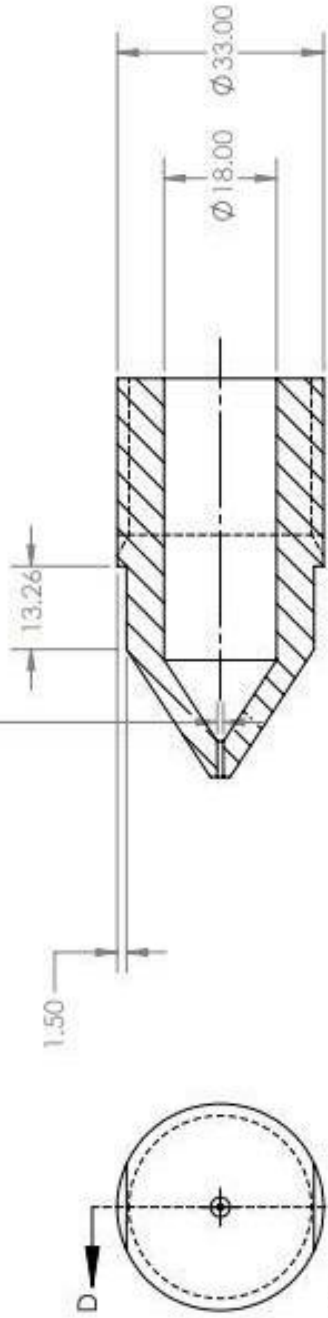
AUTOR: LIBARDO PINILLA RODRÍGUEZ

A4

REVISO: HOJA: 2

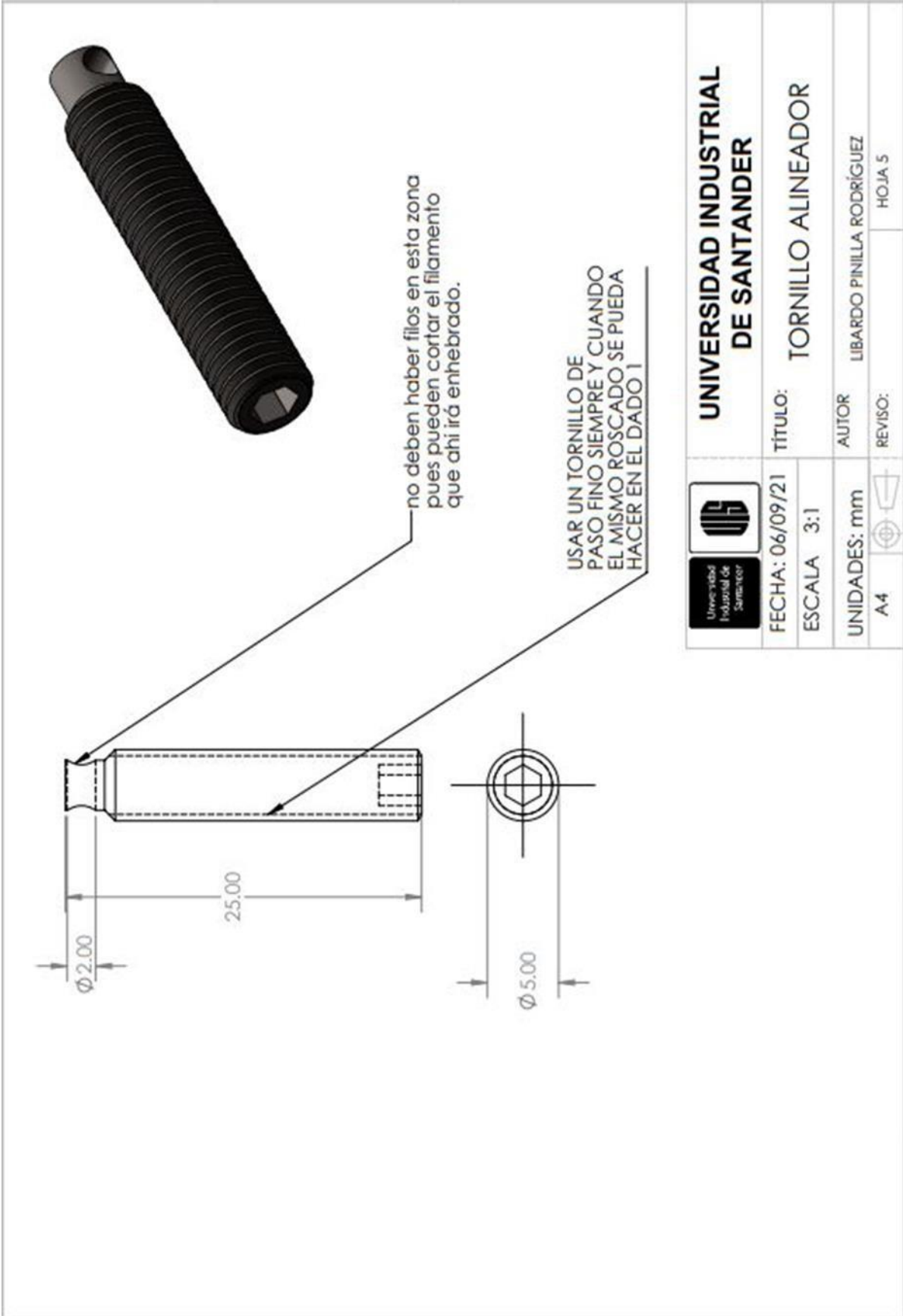


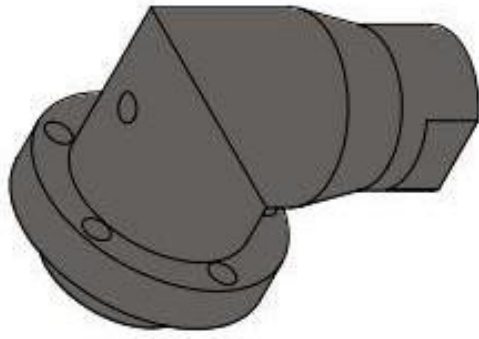
 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		TÍTULO: DADO 1	
FECHA: 28/09/21		AUTOR: LIBARDO PINILLA RODRÍGUEZ	
ESCALA: 1:1		REVISO:	
UNIDADES: mm		HOJA: 3	
A4		HOJA: 3	



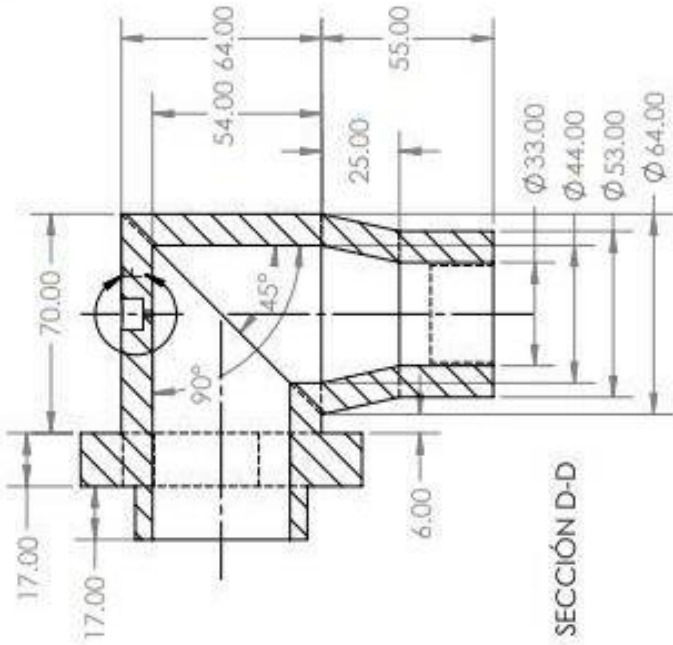
SECCIÓN D-D

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 28/09/21	TÍTULO:	BOQUILLAS (3 UND)	
ESCALA 1:1	AUTOR	LIBARDO PINILLA RODRÍGUEZ	
UNIDADES: mm	REVISO:	HOJA: 4	
A4			

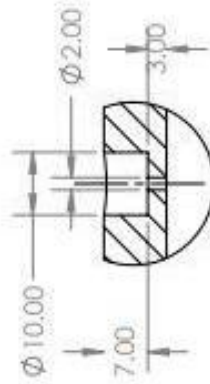
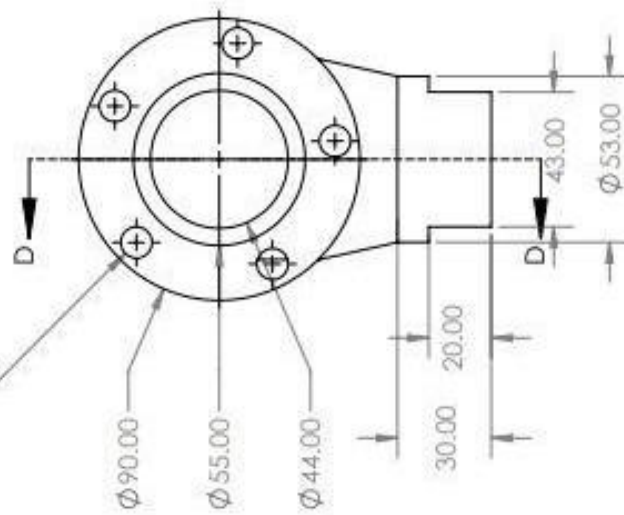




$\phi 10.00$ 72° DE SEPARACION A UN RADIO DE 37.5 mm 5 AGUJEROS PASANTES.
 TALADRAR USANDO COMO QUIA LA PIEZA TAPA YA EXISTENTE PARA GARANTIZAR QUE LA PIEZA DADO 2 QUEDE VERTICAL AL MOMENTO DE SU INSTALACION.



SECCIÓN D-D



DETALLE F
ESCALA 1 : 1



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER

FECHA: 29/09/21

ESCALA: 1-2

TÍTULO:

DADO 2

UNIDADES: mm

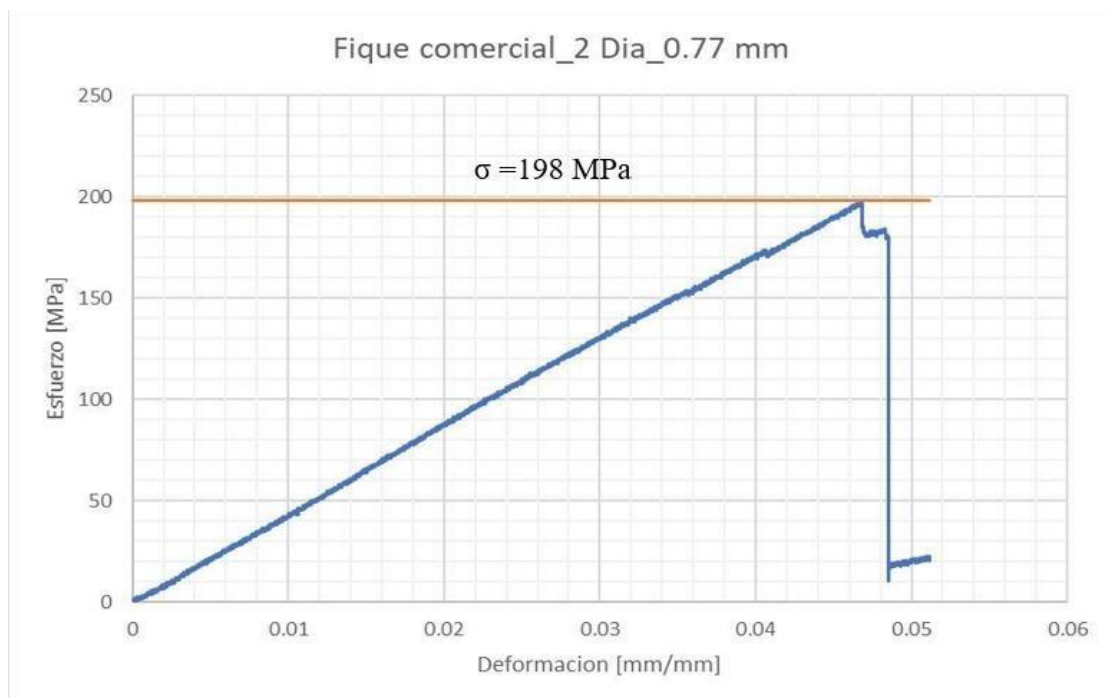
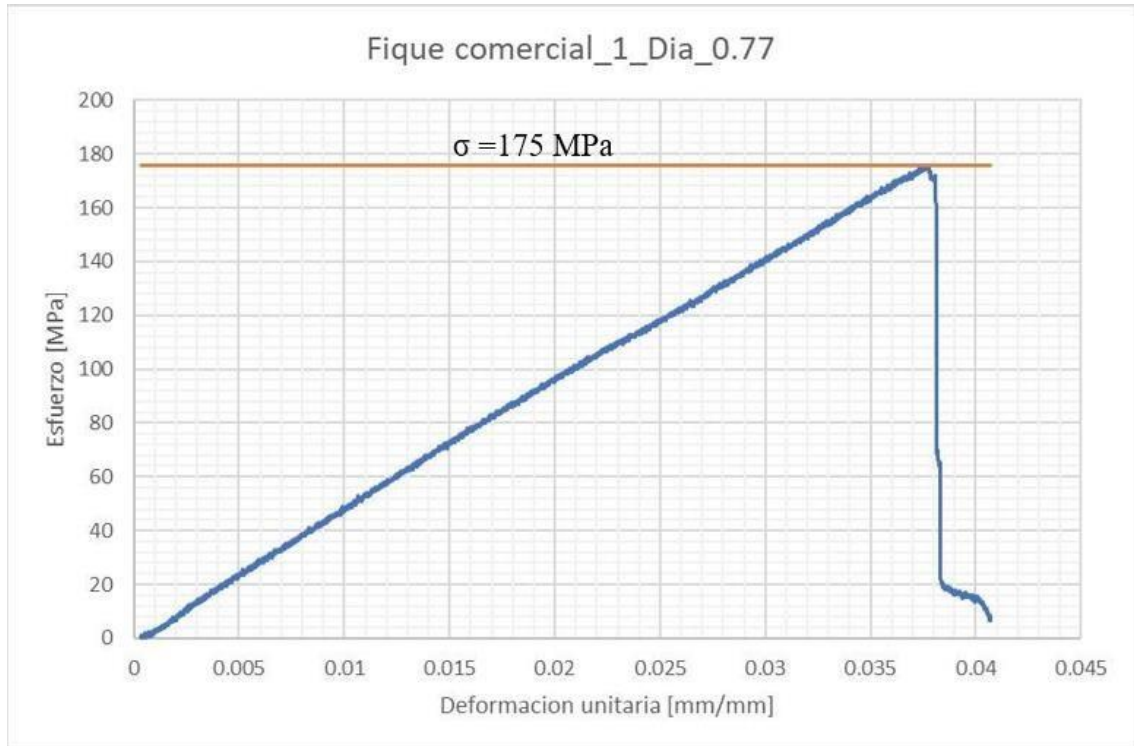
AUTOR ESTEBAN HERMAN RAMIREZ PLATA

A4

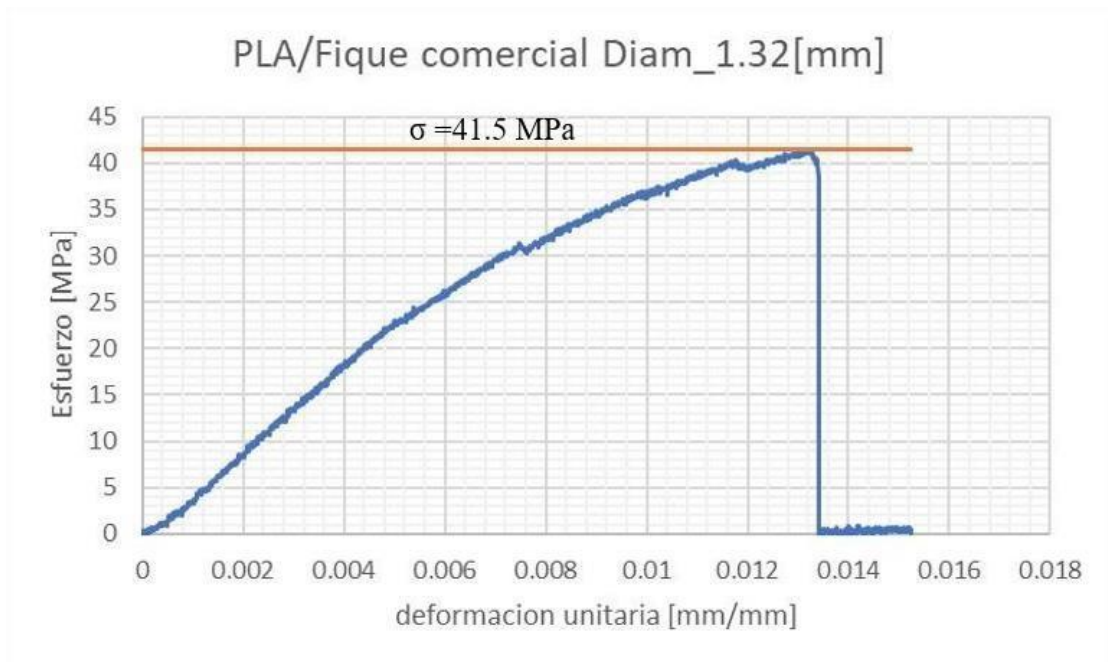
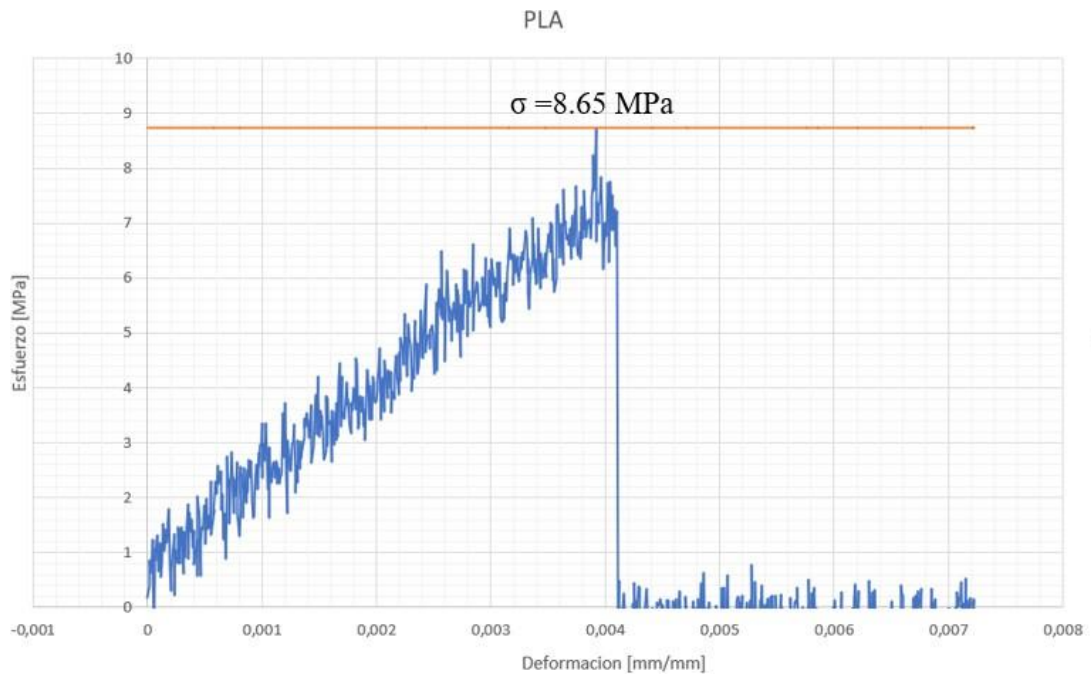
REVISO:  HOJA: 6

apéndice D

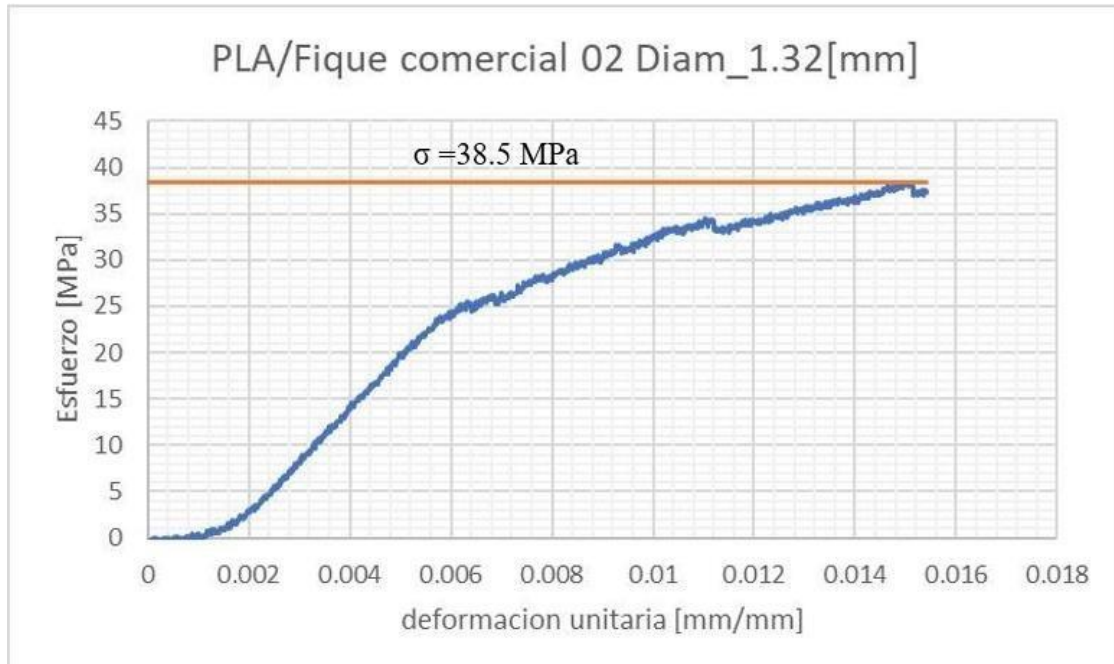
Gráficos de hilos y filamentos ensayo de tracción



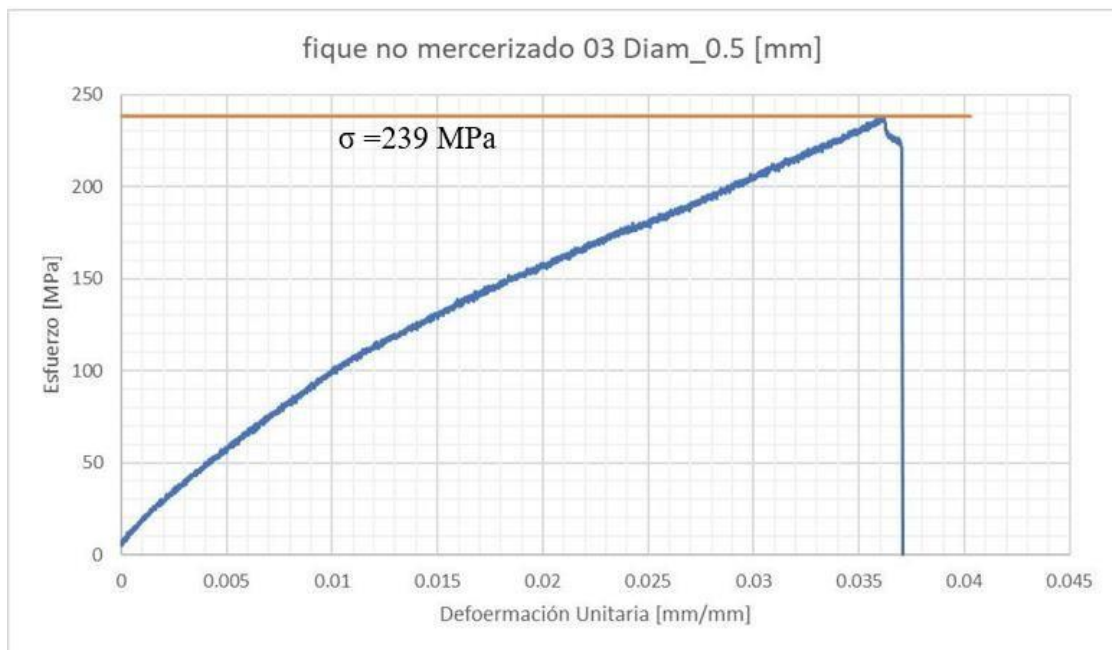
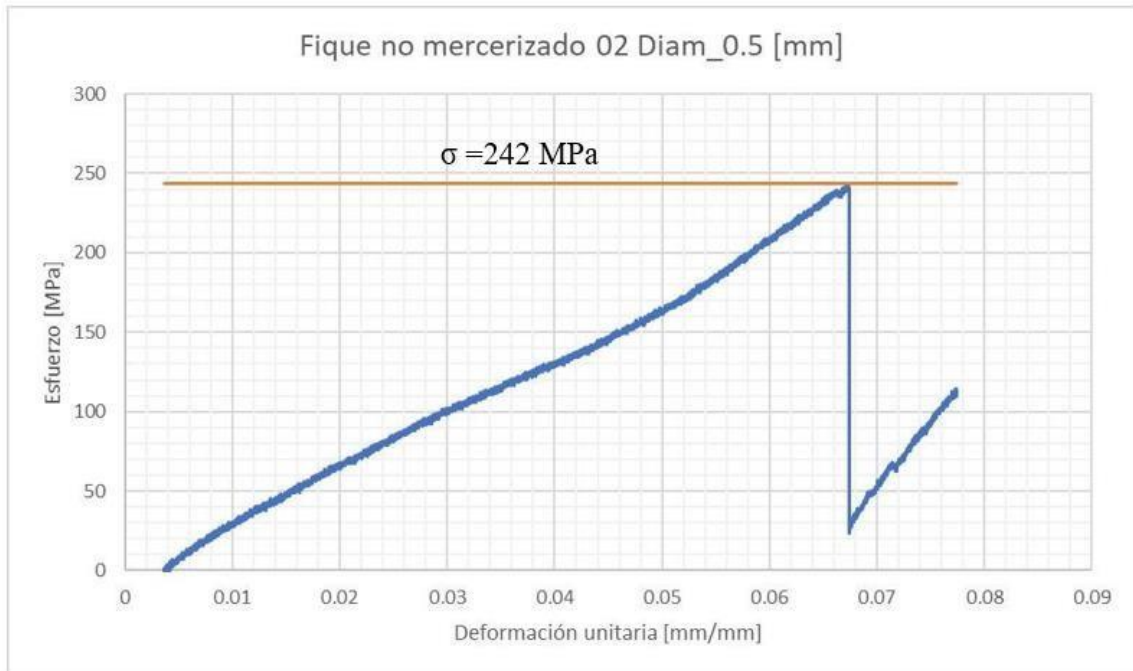
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



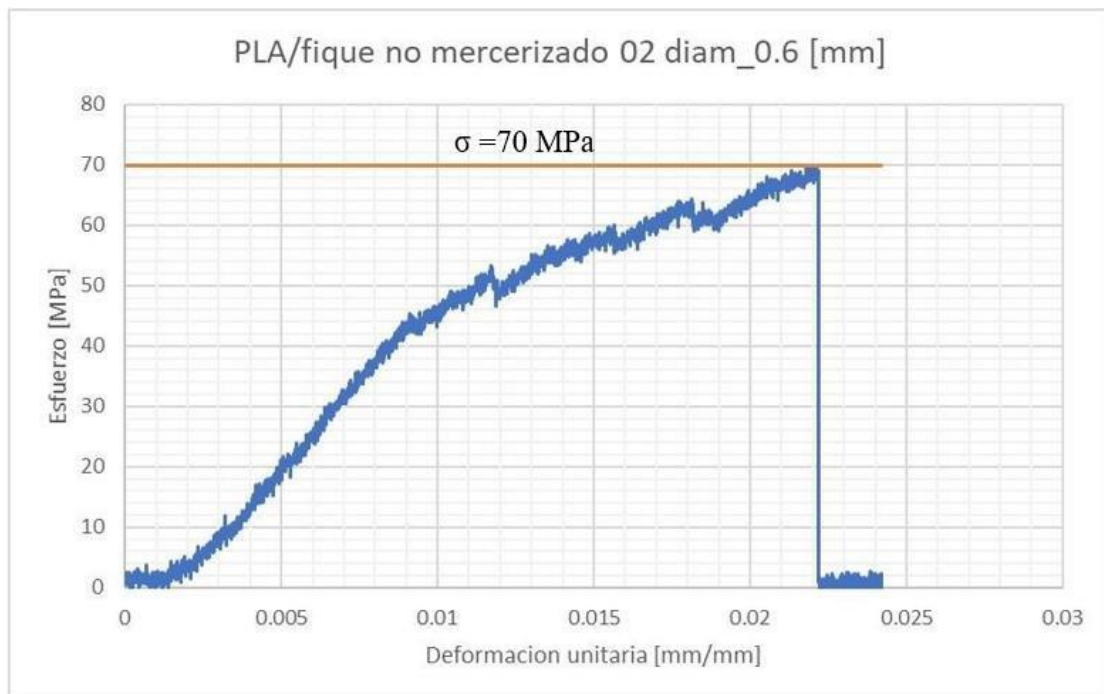
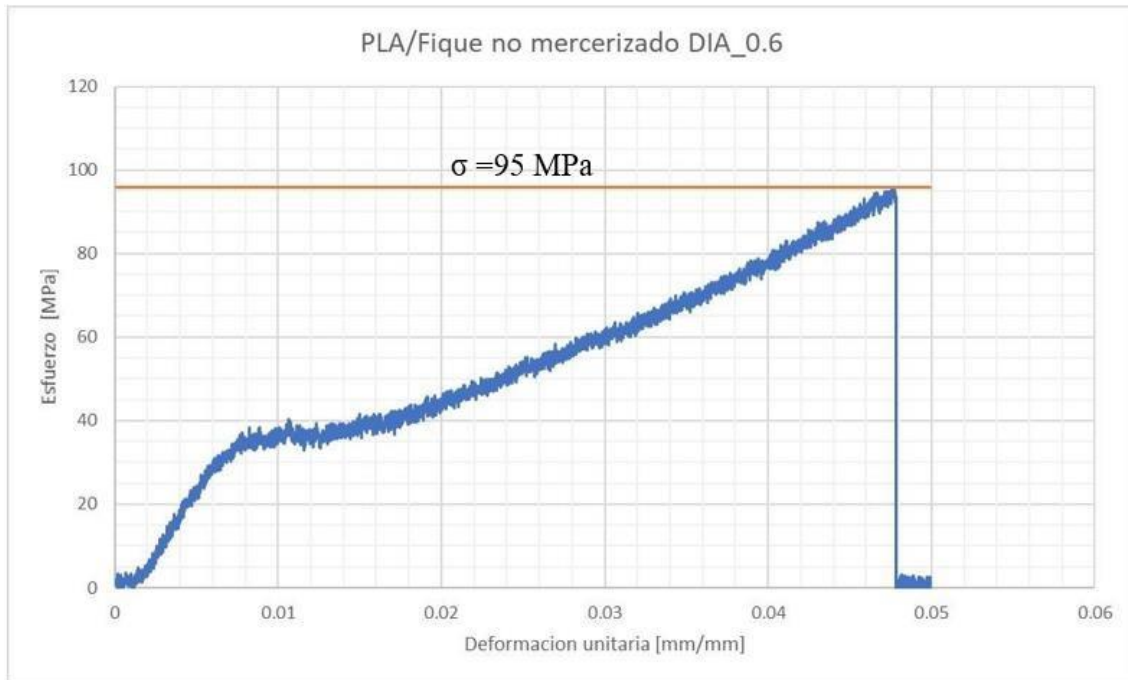
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



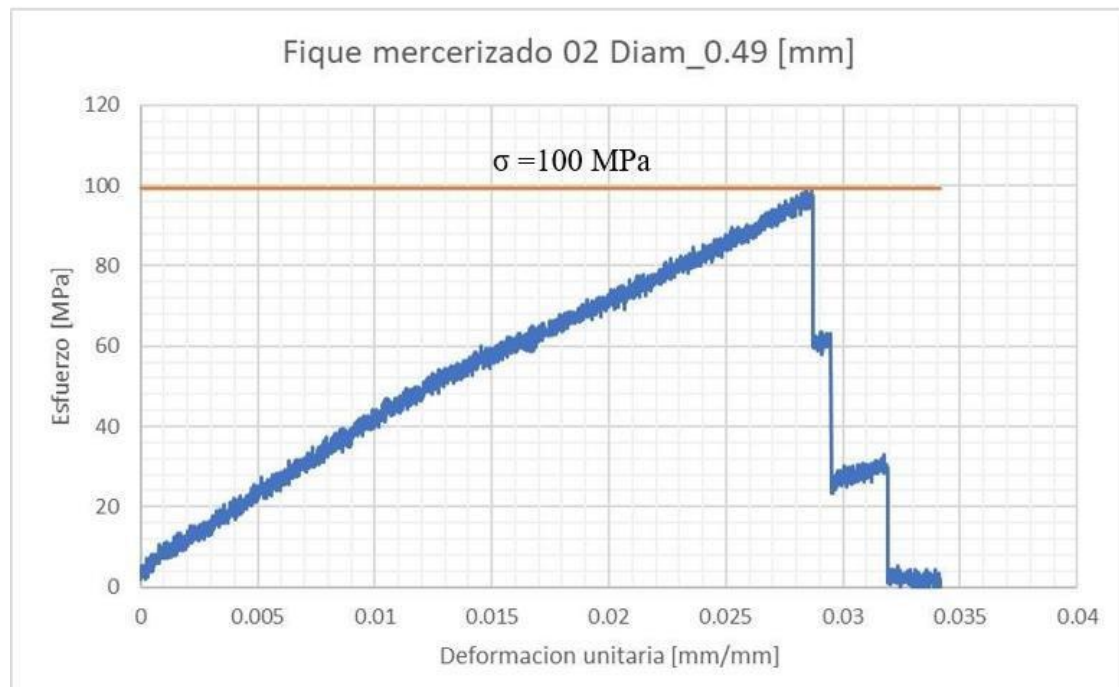
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



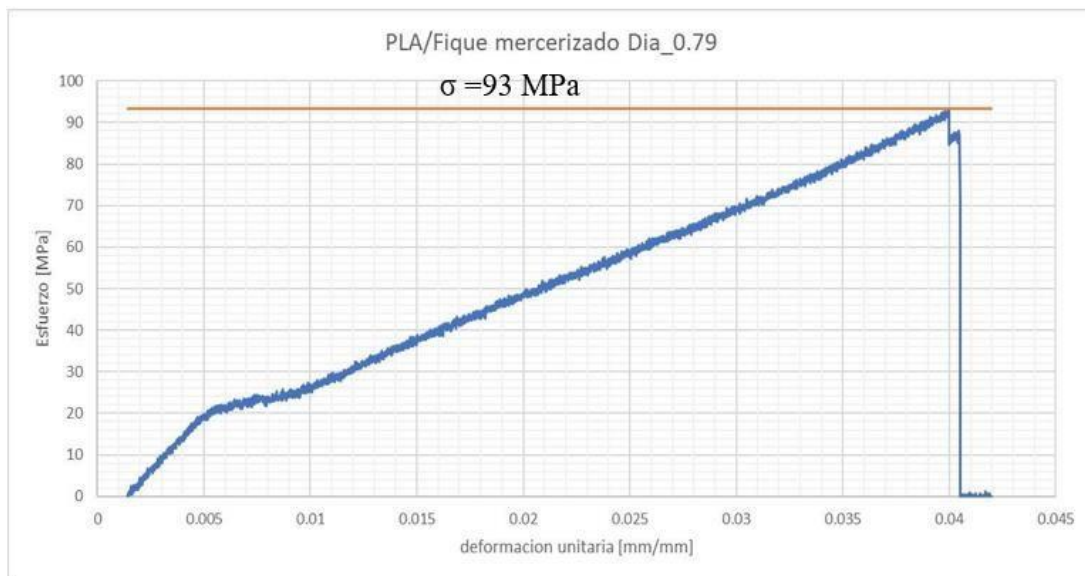
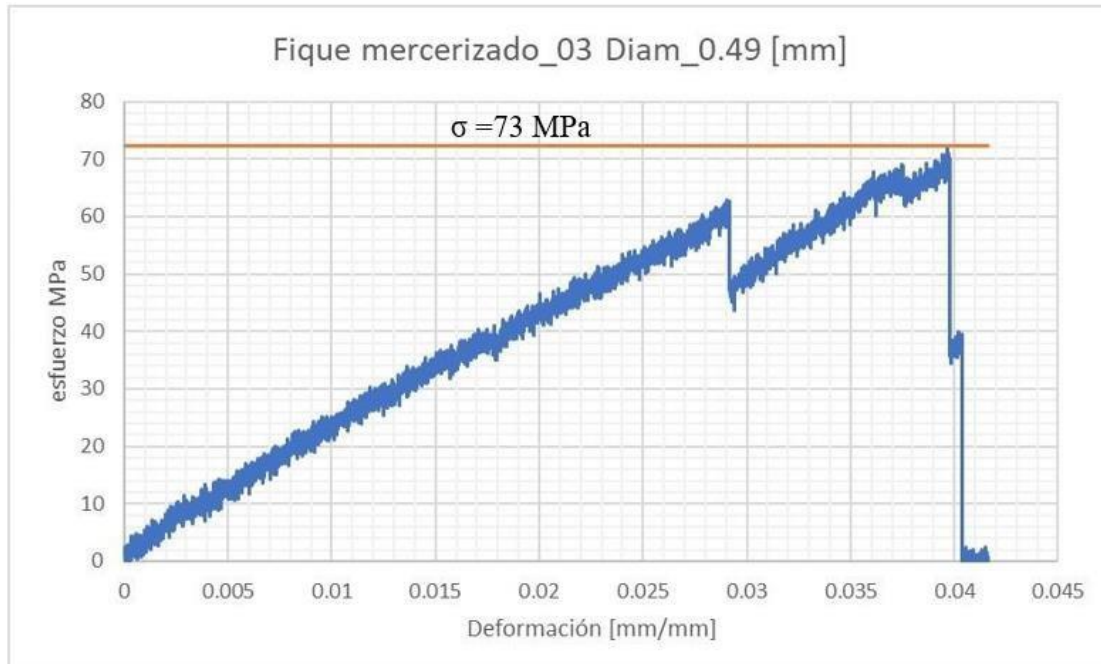
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



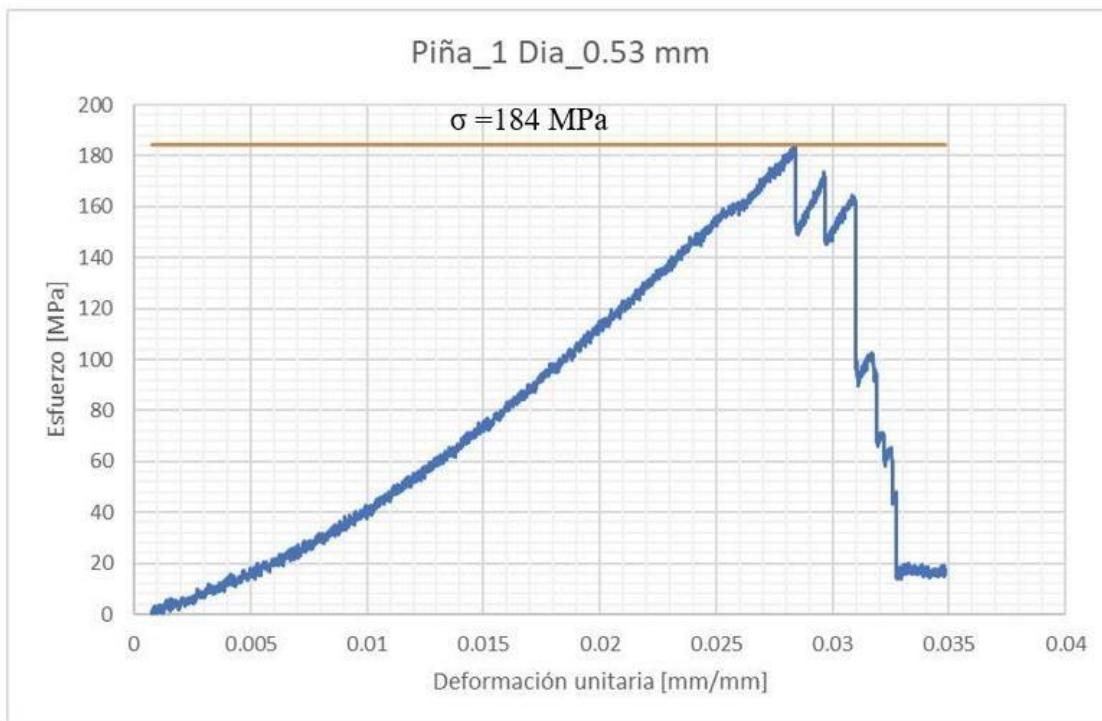
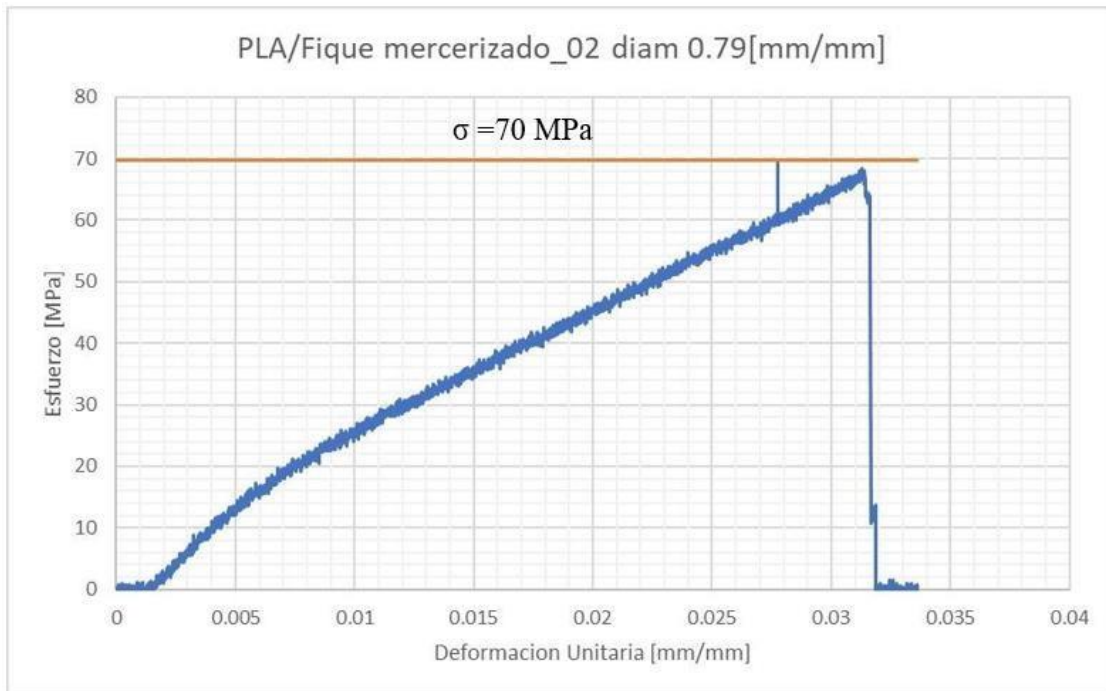
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



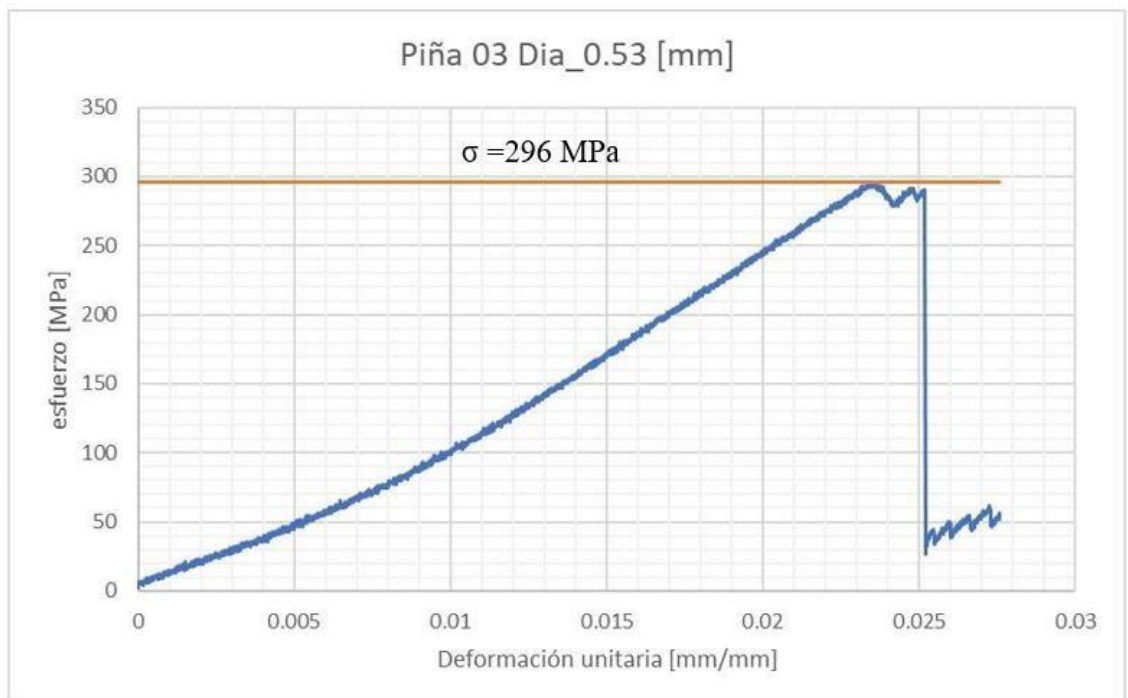
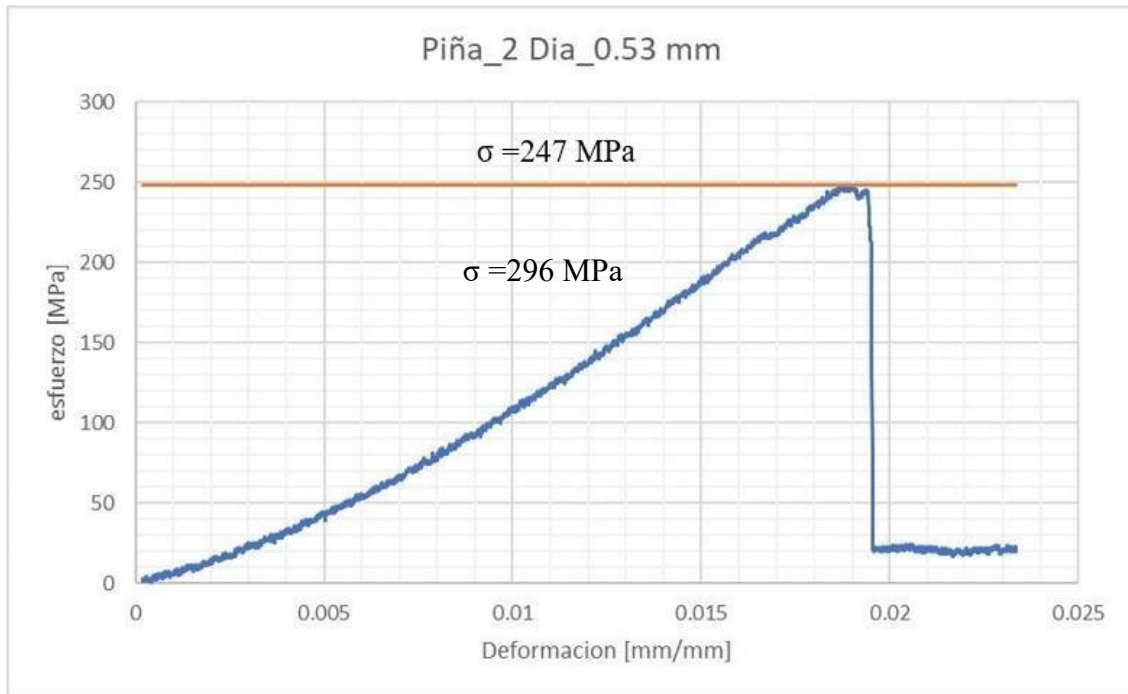
DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO



DISEÑO EXTRUSORA IMPRESIÓN 3D Y FIBRA DE REFUERZO

