

# PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Análisis de las Propiedades Mecánicas en Piezas de PLA Fabricadas por Manufactura Aditiva  
con Fibras Orgánicas de Refuerzo

César Augusto Villamizar Sierra y Bryan Javier Uribe Reyes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

William Pinto Hernández

Doctor en ingeniería mecánica

Codirector

Robin Alexis Cristancho Perilla

Ingeniero mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

## Contenido

Resumen .....	9
Abstract .....	10
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
1.1. Objetivo general .....	13
1.2. Objetivos específicos .....	13
2. Marco teórico .....	14
2.1. Estado del arte .....	14
2.1.1. A nivel internacional .....	14
2.1.2. A nivel nacional .....	17
2.2. Referentes teóricos .....	18
2.2.1. Ácido poliláctico (PLA) .....	18
2.2.2. Material compuesto .....	19
2.2.3. Propiedades mecánicas y físicas del PLA .....	20
2.2.4. Fibras naturales de refuerzo .....	21
3. Materiales y equipos .....	22
3.1. Materiales .....	22
3.1.1. Ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA, por sus siglas en inglés) peletizado .....	23
3.1.2. Ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA, por sus siglas en inglés) para impresión 3D ..	24
3.1.3. Hilo de algodón .....	25
3.2. Equipos .....	26
3.2.1. Máquina extrusora .....	26
3.2.2. Impresora 3D .....	29
3.2.3. Sistema de pruebas MTS para ensayos de tracción .....	30
3.2.4. Extensómetro axial MTS. ....	31
4. Cuerpos de prueba y procedimientos de obtención. ....	32
4.1. Filamento de PLA puro obtenido por extrusión .....	32
4.2. Filamento de PLA puro comercial para impresión 3D. ....	37

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

4.3. Filamento de PLA con refuerzo. ....	38
4.4. Probeta de PLA puro obtenida por FDM. ....	43
4.5. Probeta de PLA puro comercial para impresión 3D .....	46
4.6. Probeta de PLA con refuerzo obtenida por FDM .....	47
5. Ensayo mecánico de tracción. ....	50
5.1. Ensayo mecánico de tracción para los filamentos de PLA puro y de PLA con refuerzo .....	50
5.2. Ensayo mecánico de tracción para las probetas de PLA puro y PLA con refuerzo. ....	54
6. Resultados .....	58
6.1. Filamentos de PLA puro y con refuerzo .....	58
6.2. Probetas de PLA puro y con refuerzo .....	67
7. Discusión .....	77
7.1. Módulo de Elasticidad o Módulo de Young en los filamentos de PLA .....	78
7.2. Esfuerzo Máximo en los filamentos de PLA .....	80
7.3. Deformación en los filamentos de PLA.....	83
7.4. Módulo de Elasticidad o Módulo de Young en las probetas de PLA .....	87
7.5. Esfuerzo Máximo en las probetas de PLA.....	89
7.6. Deformación en las probetas de PLA .....	92
8. Conclusiones .....	95
9. Recomendaciones.....	97
Referencias Bibliográficas .....	98

### Lista de tablas

Tabla 1	Especificaciones del PLA .....	23
Tabla 2	Especificaciones del filamento de PLA .....	24
Tabla 3	Especificaciones del hilo de algodón.....	25
Tabla 4	Componentes de la máquina extrusora .....	28
Tabla 5	Especificaciones del extensómetro axial MTS. ....	31
Tabla 6	Configuración de parámetros para extrusión del filamento de PLA puro .....	33
Tabla 7	Características de los filamentos de PLA obtenido por extrusión .....	36
Tabla 8	Características de los filamentos de PLA comercial para impresión 3D.....	37
Tabla 9	Parámetros importantes de impresión.....	39
Tabla 10	Características de los filamentos de PLA con refuerzo. ....	42
Tabla 11	Características de las probetas de PLA con refuerzo.....	47
Tabla 12	Filamentos seleccionados para el ensayo de tracción.....	50
Tabla 13	Configuración de la prensa hidráulica MTS .....	52
Tabla 14	Probetas seleccionadas para el ensayo de tracción. ....	54
Tabla 15	Configuración de la prensa hidráulica MTS .....	55
Tabla 16	Resultados del filamento extruido, FE.....	65
Tabla 17	Resultados del filamento de PLA puro obtenido por extrusión, FC.....	66
Tabla 18	Resultados del filamento de PLA Comercial con refuerzo.....	66
Tabla 19	Resultados PR 13%.....	74
Tabla 20	Resultados PLA puro obtenido por extrusión.....	75
Tabla 21	Resultados PLA comercial.....	76
Tabla 22	Resultados PLA con refuerzo del 27% .....	76
Tabla 23	Resultados PLA con refuerzo del 40% .....	77
Tabla 24	Módulo de elasticidad (GPa) de los filamentos .....	78
Tabla 25	Análisis de varianza para el Módulo de Young de los filamentos.....	79
Tabla 26	Esfuerzo máximo (MPa) de los filamentos.....	81
Tabla 27	Análisis de varianza para el Esfuerzo máximo de los filamentos.....	82
Tabla 28	Deformación (%) de los filamentos .....	84

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Tabla 29	Análisis de varianza para la deformación de los filamentos.....	85
Tabla 30	Módulo de Young (GPa) de las probetas.....	87
Tabla 31	Análisis de varianza para el Módulo de Young de las probetas .....	88
Tabla 32	Esfuerzo máximo (MPa) de las probetas .....	90
Tabla 33	Análisis de varianza para el Esfuerzo máximo de las probetas .....	90
Tabla 34	Deformación (%) de las probetas.....	92
Tabla 35	Análisis de varianza para la deformación de las probetas .....	93

### Lista de figuras

Figura 1	Materiales compuestos.....	20
Figura 2	Fibras Naturales .....	22
Figura 3	Pellets de PLA.....	23
Figura 4	(a) Especificaciones del filamento de PLA.....	24
Figura 5	Etiqueta fabricante .....	25
Figura 6	(a)Máquina extrusora(b)Distribución de las resistencias(c)Variador de velocidad	26
Figura 7	Esquema interno de la extrusora .....	29
Figura 8	Impresora 3D. ARTILLERY, Genius.....	30
Figura 9	MTS Bionix. Tabletop Test System.....	31
Figura 10	Extensómetro MTS .....	32
Figura 11	Temperaturas de trabajo para el proceso de extrusión.....	33
Figura 12	Extracción de filamento de PLA.....	34
Figura 13	Piscina de agua precalentada .....	34
Figura 14	Filamento de PLA seleccionado para prueba de tracción e impresión 3D .....	35
Figura 15	Cuerpos de prueba de PLA extruido para ensayo de tracción .....	37
Figura 16	Cuerpos de prueba de PLA comercial para ensayo de tracción.....	38
Figura 17	Filamento en software de impresión 3D Ultimaker Cura .....	39
Figura 18	Secuencia de impresión del filamento en una misma capa.....	41
Figura 19	Filamento de PLA con fibra continua de algodón como refuerzo .....	41
Figura 20	Cuerpos de prueba de PLA con refuerzo para prueba de tracción.....	43
Figura 21	Dimensiones de la probeta de tracción .....	43
Figura 22	Probeta en software de impresión 3D Ultimaker Cura .....	44
Figura 23	Tipo de relleno de las probetas .....	44
Figura 24	Impresión de probetas de PLA puro .....	45
Figura 25	Probetas de PLA puro .....	45
Figura 26	Probetas de PLA puro comercial para impresión 3D (a) Probeta N°9 (b) Probetas N°10, 11,12 y 13.....	46
Figura 27	Representación de capas de refuerzo (Amarillo) sobre las capas de PLA (Azul), (a) 13%, (b) 27% (c) 40% .....	48

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Figura 28	Impresión de las probetas de PLA con refuerzo .....	48
Figura 29	Probetas de PLA con refuerzo (a) 13%, (b) 27%, (c) 40% .....	49
Figura 30	Fuerza de las mordazas de la prensa hidráulica .....	51
Figura 31	Ensayo de tracción de los filamentos seleccionados.....	52
Figura 32	Filamento con fractura (a) PLA puro extruido (b) PLA puro comercial (c) PLA con refuerzo .....	53
Figura 33	Fuerza de las mordazas de la prensa hidráulica .....	55
Figura 34	Ensayo de tracción de las probetas seleccionadas .....	56
Figura 35	Probetas fracturadas (a) PLA puro extruido, (b) PLA puro comercial, (c) PLA con refuerzo de 13%,(d)PLA con refuerzo de 27%,(e)PLA con refuerzo de 40%. 57	57
Figura 36	Fuerza vs Alargamiento de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con fibra continua de refuerzo .....	60
Figura 37	Esfuerzo vs Deformación unitaria de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con fibra continua de refuerzo .....	61
Figura 38	Zona elástica del filamento FE-4 .....	63
Figura 39	Zona elástica de los filamentos obtenidos por extrusión .....	64
Figura 40	Fuerza vs Alargamiento de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con refuerzo de 13%, (d) PLA con refuerzo de 27%, (e) PLA con refuerzo de 40% .....	68
Figura 41	Esfuerzo vs Deformación unitaria de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con refuerzo de 13%, (d) PLA con refuerzo de 27%, (e) PLA con refuerzo de 40% .....	70
Figura 42	Zona elástica de la probeta PR1 13% .....	73
Figura 43	Zona elástica promedio de las probetas PR 13% .....	74
Figura 44	Promedios del Módulo de Young de los filamentos.....	80
Figura 45	Promedios del Esfuerzo máximo de los filamentos.....	83
Figura 46	Promedios de la Deformación de los filamentos .....	86
Figura 47	Comportamiento general de los filamentos .....	86
Figura 48	Promedios del Módulo de Young de las probetas .....	89
Figura 49	Promedios del Esfuerzo máximo de las probetas .....	91
Figura 50	Promedios de la Deformación de las probetas .....	94
Figura 51	Comportamiento general de las probetas.....	94

**Lista de Anexos**

Ver anexos adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Anexo A. Ficha técnica del PLA en pellets fabricado por Nature Works.

## Resumen

**Título:** Análisis de las Propiedades Mecánicas en Piezas de PLA Fabricadas por Manufactura Aditiva con Fibras Orgánicas de Refuerzo

**Autores:** César Augusto Villamizar Sierra y Bryan Javier Uribe Reyes

**Palabras clave:** Acido poliláctico, Biodegradable, Fibra de refuerzo, Fibra natural, Material compuesto, Tensión, PLA.

### Descripción:

La contaminación por la cantidad de plásticos que se producen actualmente es uno de los problemas más grandes a nivel mundial. Debido a ello se han puesto en marcha estudios para encontrar alternativas que suplan la necesidad de estos plásticos. Una de las opciones más empleadas es el ácido poliláctico (PLA) que es un biopolímero termoplástico que permite mezclarse con otros materiales como las fibras naturales o fibras de refuerzo. Para este proyecto se obtuvo filamentos de 3 tipos, PLA puro extruido, PLA puro comercial para impresión 3D y PLA con fibra de algodón como refuerzo. Con estos filamentos se elaboraron mediante impresión 3D probetas de PLA puro extruido, PLA puro comercial y PLA con refuerzo de algodón en porcentajes del 13%, 27% y 40% adicionales a la masa inicial de la probeta. Posteriormente los cuerpos de prueba fueron sometidos a ensayos de tracción según la norma ASTM D-3822 para los filamentos y ASTM D-638-14 para los cuerpos fabricados por manufactura aditiva, con el fin de caracterizar mecánicamente los materiales y evaluar la influencia de las fibras de refuerzo (algodón) en las propiedades mecánicas. Una vez se analizaron los resultados, se observó que, los filamentos de material compuesto disminuyeron las propiedades a tracción, mientras que, en las probetas, la adición del algodón como refuerzo, mejoró el comportamiento a tracción de los cuerpos hasta un 10% adicional respecto al material sin refuerzo.

### Abstract

**Title:** Analysis of Mechanical Properties in PLA Pieces Produced by Additive Manufacturing with Organic Reinforcing Fibers

**Authors:** César Augusto Villamizar Sierra & Bryan Javier Uribe Reyes

**Keywords:** Polylactic acid, biodegradable, reinforcing fiber, natural fiber, composite material, tension, PLA.

#### **Description:**

Pollution due to the amount of plastic that is currently produced is one of the biggest problems worldwide. Due to that, studies have been launched to find alternatives that meet the need for these plastics. One of the most used options is polylactic acid (PLA), which is a thermoplastic biopolymer that allows to be mixed with other materials such as natural fibers or reinforcing fibers. For this project, three types of filaments were obtained, pure extruded PLA, pure commercial PLA for 3D printing and PLA with cotton fiber as reinforcing. With these filaments, were made by 3D printing test coupons of pure extruded PLA, pure commercial PLA and PLA with cotton reinforcing in percentages of 13%, 27% and 40% additional to the initial mass of the test coupons. Subsequently, test coupons were tensile tested according to ASTM D-3822 standard for pure filaments and according to ASTM D-638-14 standard for test coupons produced by additive manufacturing, in order to obtain mechanical characterization for those materials and to evaluate the influence of the reinforcing fibers (cotton) in the final mechanical properties. After the results were analyzed, it was shown that the filaments of composite material decreased the tensile properties, while, in the test coupons, the addition of cotton as reinforcing increased the tensile properties up to additional 10% compared with the unreinforced material.

## Introducción

Actualmente, en la industria de la impresión 3D se usan diversos tipos de filamentos, siendo los más comunes aquellos obtenidos a base de petróleo, por lo que el tiempo para su descomposición es mayor a otros materiales, dicha situación afecta de forma directa a la preservación del medio ambiente. Según un informe de la Facultad de Derecho de la Universidad de los Andes y Greenpeace Colombia (2019) el consumo del material plástico como materia prima y empaques en Colombia es de 1.250.000 toneladas por año. De las que se recicla entre 300.000 – 350.000 toneladas en el mismo periodo (Cristina Estrada Rudas, 2021). Por lo anterior, existe un gran esfuerzo en la investigación para el desarrollo de plásticos biodegradables o bioplásticos a partir de recursos sostenibles para diferentes aplicaciones.

El PLA (Ácido Poliláctico) es un termoplástico fabricado a base de materia orgánica, lo que resulta en un tiempo de descomposición o biodegradación (bajo ciertas condiciones) menor que otros filamentos, sin embargo, este no posee las mismas propiedades mecánicas que los filamentos a base de petróleo, ya que es rígido y quebradizo a temperatura ambiente (Farah et al., 2016). Por lo que la aplicación principal del PLA en la impresión 3D suele ser para elementos o figuras decorativas.

El principal objetivo de esta investigación es abordar el estudio de los materiales compuestos, en este caso material compuesto reforzado con fibras naturales. Para el desarrollo de este proyecto se elaboraron cuerpos de prueba por medio de FDM, a partir de filamento obtenido de PLA en forma de pellets. Se evaluaron filamentos y probetas de PLA puro y PLA

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

con fibra natural de algodón, para posteriormente analizar los resultados de sus propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción (Según la norma ASTM D-3822 para los filamentos y ASTM D-638-14 para las probetas). Como cierre, evalúa la influencia de las fibras de algodón como refuerzo en la matriz de PLA y se considera la relevancia de su implementación para futuras aplicaciones.

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del algodón como fibra orgánica de refuerzo en las propiedades mecánicas de las piezas de PLA fabricadas por manufactura aditiva.

### 1.2. Objetivos específicos

- Fabricar filamento de PLA puro y filamento de PLA con fibra continua de algodón como refuerzo para caracterizar sus propiedades mecánicas a tracción acorde a la norma ASTM D-3822.
- Elaborar por medio de manufactura aditiva probetas de PLA puro y probetas de PLA con fibra de algodón como refuerzo en porcentajes de 13%, 27% y 40% adicional de la masa inicial.
- Evaluar el comportamiento mecánico a tracción para los cuerpos de prueba fabricados por manufactura aditiva con PLA puro y con refuerzo; acorde a la norma ASTM D-638-14.

## 2. Marco teórico

Estado del arte, dividido en documentos nacionales e internacionales y se complementa con referentes teóricos relevantes para la comprensión del contenido del documento.

### 2.1. Estado del arte

A continuación, se presentan los artículos y proyectos de grado consultados como guía para el desarrollo del presente trabajo.

#### 2.1.1. *A nivel internacional*

**Caracterización de probetas de termoplástico fabricadas mediante impresión 3D.** El objetivo del proyecto fue caracterizar el comportamiento mecánico de piezas de ABS y PLA fabricadas por manufactura aditiva, variando la orientación de sus fibras (horizontal y vertical: perpendicular a la aplicación de la carga) y a partir de los datos obtenidos generar un modelo aplicable que pueda representar el comportamiento en la zona elástica de las piezas sometidas a flexión. Se realizaron ensayos de tracción, compresión y flexión, con lo que se determinó el módulo de Young, el esfuerzo a la fluencia y el esfuerzo máximo. De la realización del trabajo, se concluyó que la orientación horizontal presentó un mejor desempeño en las pruebas de tracción. Para las pruebas de compresión, no se identificó una diferencia considerable causada por la orientación de las fibras analizadas. Se resalta que, para los ensayos realizados de un mismo

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

material con igual orientación de fibras, se encontraron diferentes valores para el Módulo de Young y para la resistencia máxima (Vukasovic, 2018).

**Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO.** En este proyecto, se buscó analizar las propiedades mecánicas de tres materiales que suelen ser usados en impresión 3D. Se resalta la importancia e influencia de los parámetros de impresión, tales como la velocidad de impresión, la temperatura de la boquilla y de la cama, el patrón y la densidad del relleno, entre otros factores. Para las probetas obtenidas, se varió la densidad de estas con valores de 40 y 80%. Se concluyó que para las probetas con plastificante natural y densidad del 80% se obtuvo una mejora en la elongación, también se obtuvo que la variación de la densidad del relleno influye en gran medida sobre la variación del esfuerzo máximo de los materiales estudiados (Pacheco, 2019).

**Ácido láctico y poliláctico: situación actual y tendencias.** Herryman y Blanco (2005) exponen la preocupación por el impacto ambiental provocado por los desperdicios de los plásticos y se resalta que los métodos para su disposición son muy limitados, lo que ha llevado a buscar alternativas en el uso de polímeros biodegradables que reemplacen la aplicación de los plásticos convencionales. En la búsqueda de dichas alternativas se ha encontrado un polímero totalmente biodegradable conocido como ácido poliláctico (PLA), cuya implementación resulta muy atractiva por su versatilidad en la aplicación de distintas ramas industriales.

A lo largo del artículo se contextualiza sobre la historia del ácido láctico y poliláctico, presentando su composición, fabricación, ventajas, derivados, propiedades mecánicas y usos en las industrias. En el desarrollo del artículo se exponen las ventajas que posee el PLA por ser un polímero biodegradable, lo cual lo hace un producto muy deseado y comercial.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Thermorheological and mechanical properties of cellulose reinforced PLA bio-composites.** Awal & Sain (2015) realizaron el análisis de las propiedades termoreológicas y mecánicas del PLA reforzado con fibras de madera. Para el desarrollo de la investigación y buscando asegurar la adherencia entre las fibras y la matriz (baja adherencia de fibra-matriz implica malas propiedades mecánicas), se decidió usar bioadimida que también ayuda a facilitar la procesabilidad del compuesto PLA-fibras de madera. En el artículo se mencionan los procedimientos llevados a cabo para procesar los materiales a estudiar, también se definen parámetros de extrusión para el material compuesto. Una vez realizadas las pruebas se procede al análisis de los resultados.

Se concluyó que la procesabilidad de los biocompuestos mejoró en aquellos con bioadimida, reduciendo la viscosidad dentro de la región de baja velocidad de corte, por lo que se requirió menor energía para procesar el material. De la prueba de tracción, se determinó que el PLA/WP/Bioadimida (78,7/20/1,3 % en peso) presentó una resistencia a la tracción de 68 MPa, este valor fue mayor que el obtenido para el PLA puro y el compuesto PLA/WP (80/20 % en peso).

Se resalta que el comportamiento mecánico del compuesto se ve influenciado por la orientación de las fibras internas, dicha orientación de fibras fue analizada por medio de Tomografía computarizada (TC) de rayos X. Se concluyó que es posible alinearlas en diferentes direcciones con el uso de diferentes geometrías de troquel y que el compuesto tendrá una mayor resistencia mecánica al lograr que las fibras de refuerzo se orienten en la misma dirección en que se aplica la fuerza.

**Properties of 3D-Printed Wood Sawdust-Reinforced PLA composites.** Narlioğlu et al. (2021) buscaron investigar las propiedades térmicas, morfológicas y mecánicas de compuestos de PLA impresos en 3D reforzados con manufactura aditiva de diferentes cantidades de aserrín de

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

pino negro residual. El aserrín preparado previamente se mezcló con el polímero PLA en proporciones de 0-5-10-15-20% en peso para la producción del filamento compuesto. Para determinar las propiedades mecánicas se tuvieron en cuenta las normas ASTM D638-14 Y D790-17; para analizar sus propiedades térmicas se hizo un análisis termo gravimétrico (TGA) entre los 25 y 600 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en una atmosfera de nitrógeno inerte con caudal de 50 mL/min; finalmente para determinar sus características morfológicas se tomaron imágenes microscópicas para examinar la distribución de aserrín en el compuesto y poder comparar con la matriz de PLA.

De los resultados obtenidos se concluyó que la resistencia a la tracción disminuyó en comparación con el polímero puro, los valores de resistencia a la flexión de las muestras fueron bastante altos comparados con la muestra de PLA puro, en cambio en los resultados de sus propiedades térmicas, se observa que la estabilidad térmica de la muestra obtenida del polímero PLA fue mayor a las de las muestras compuestas.

### *2.1.2. A nivel nacional*

**Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA) reciclado y modificado con lignina.** López y Barrera (2019) realizaron la caracterización del PLA reciclado y modificado con lignina. Para esto se elaboraron probetas de PLA puro, PLA reciclado y PLA reciclado reforzado con lignina (concentración de lignina de 1%, 3% y 5% del peso total). Las probetas fueron elaboradas por el método de moldeo abierto y se realizaron ensayos de tensión y flexión, regidos por las normas ASTM D638-14 y ASTM D790-03. En el documento del proyecto, se describe la obtención de los materiales usados para la fase experimental y el proceso de mezclado de estos. Una vez realizados los ensayos, se procedió al análisis de datos, de

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

lo que se concluyó que las propiedades mecánicas del PLA reciclado se mantienen próximas a las del PLA puro, y que al adicionar un 1% de lignina al PLA reciclado, se logra mejorar las propiedades mecánicas del PLA reciclado.

**Elaboración y caracterización de componentes plásticos porosos, mediante impresión 3D para aplicaciones de regeneración ósea.** Rodríguez y Restrepo (2015) basaron su proyecto en lograr elaborar y caracterizar componentes plásticos porosos a partir de su fabricación por medio de impresión 3D para su aplicación en procesos de regeneración ósea. Para lo que fue necesario realizar ensayos de tensión, de dureza y se hizo una revisión de la estructura interna del material por medio SEM (Microscopio de barrido electrónico), también se modeló el comportamiento de las estructuras obtenidas por medio de software de elementos finitos. Dentro de las conclusiones del trabajo, se resalta que, tanto para el PLA como para el ABS, se obtuvo una mayor resistencia a la tracción y menor dureza: a mayor espesor de capa (0.3 mm), menor porosidad (50%) y menor ángulo de trama (0-90°). Comportamiento probablemente causado por la influencia de los parámetros mencionados.

### 2.2. Referentes teóricos

A continuación, se presenta la terminología básica considerada útil para una correcta comprensión del trabajo de grado desarrollado.

#### 2.2.1 *Acido poliláctico (PLA)*

Es uno de los polímeros biodegradables más conocidos debido a su gran potencial comercial por las características que ofrece como la fácil manipulación, su estética, resistencia

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

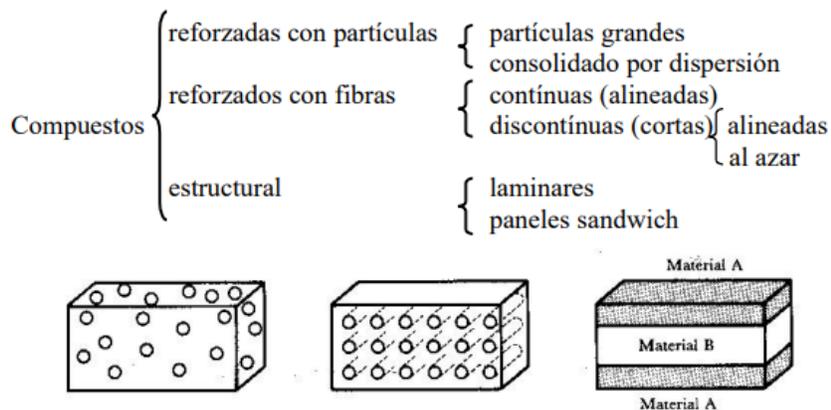
mecánica entre otros. El PLA, se obtiene de recursos naturales renovables como el almidón de maíz que al fermentarse produce el ácido láctico, seguido de una policondensación gradual en PLA. El PLA posee una amplia gama de aplicaciones como plástico ingenieril, pero éstas pueden verse limitadas por su comportamiento frágil. Sin embargo, las propiedades mecánicas y térmicas del PLA pueden ser modificadas adicionando fibras o rellenos en donde se mantiene el PLA como matriz, lo que ha sido objeto de estudio con el fin de continuar aumentando su gama de aplicaciones. El PLA posee una temperatura de transición vítrea de entre 55 y 60°C. Y una temperatura de fusión alrededor de los 155°C (Awal & Sain, 2015).

### ***2.2.2 Material compuesto***

Unión o mezcla de dos o más materiales para dar una combinación de propiedades, que no se pueden obtener con los componentes de forma individual. Los materiales suelen seleccionarse para obtener mejores valores de rigidez, resistencia, peso, dureza, entre otros (Askeland & Wright, 2017).

Como punto final, se supone que la elección y las características de la matriz de PLA (propiedades estereoquímicas, moleculares, térmicas y mecánicas) pueden desempeñar un papel clave en la determinación del rendimiento de los biocompuestos, su procesabilidad y biodegradabilidad (Murariu & Dubois, 2016). En la Figura 1, se presentan las posibles combinaciones estructurales de los materiales compuestos.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 1***Materiales compuestos*

*Nota.* Posible configuración de los materiales compuestos. Tomada de Materiales de Ingeniería, por Eduardo Donoso, 2007, (u-cursos.cl).

**2.2.3 Propiedades mecánicas y físicas del PLA**

Los polímeros pueden ser semicristalinos o amorfos. Los polímeros de línea semicristalina tienen unidades repetitivas regulares que permiten que las cadenas se plieguen en regiones densas llamadas cristalitas. Estos actúan como entrecruzamientos dando al polímero mayor resistencia a la tracción y mayor módulo (rigidez).

En estado sólido, el PLA puede ser amorfo o semicristalino, dependiendo de la estereoquímica y la historia térmica, la  $T_g$  determina la temperatura de uso superior para la mayoría de las aplicaciones. Para los PLA semicristalinos, tanto la  $T_g$  ( $\sim 58$  °C) como la  $T_m$ , (130–230 °C, dependiendo de la estructura) son importantes para determinar el uso de temperaturas en diversas aplicaciones.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Se prefiere el PLA semicristalino al polímero amorfo cuando se desean propiedades mecánicas más altas.

Las propiedades mecánicas del PLA que se estudian más intensamente en comparación con una serie de biopolímeros incluyen propiedades de tracción: resistencia a la tracción ( $\sigma$ , en MPa), módulo de tracción (E, en GPa), resistencia última de deformación ( $\epsilon$ , en %) y densidad del polímero ( $\rho$ , en g/cm<sup>3</sup>) (Farah et al., 2016).

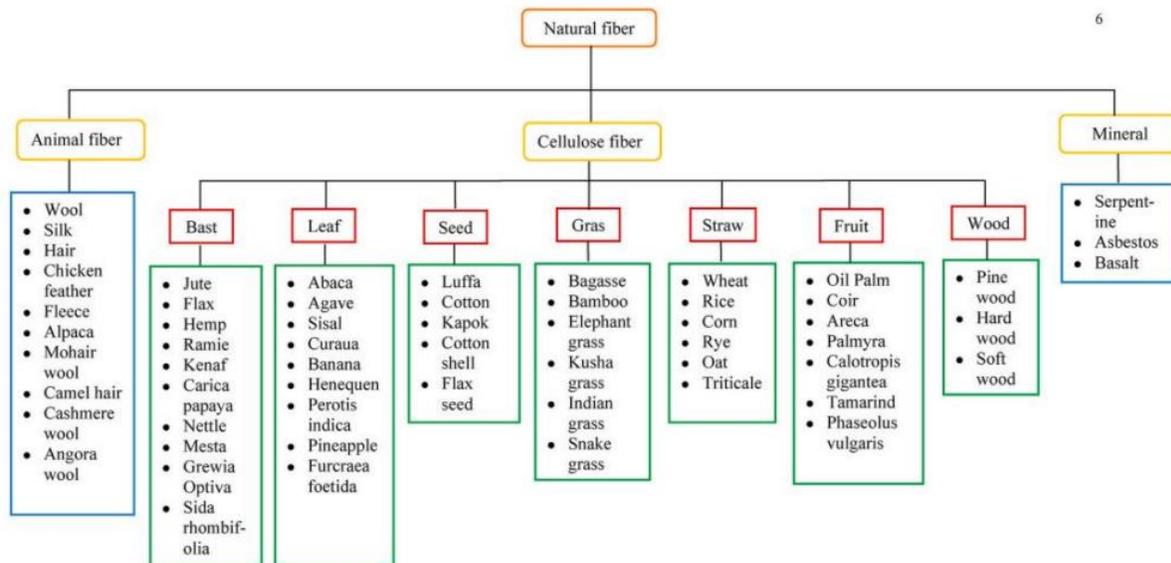
### ***2.2.4. Fibras naturales de refuerzo***

La aplicación de los polímeros a nivel estructural y de carga, se limita por la baja resistencia y rigidez de los polímeros, por ende, se refuerzan con fibras. Las fibras naturales se pueden dividir en 3 grandes grupos. Fibras animales, fibras de celulosa y fibras minerales, como se muestra en la Figura 2. Las aplicaciones de las fibras de celulosa son las más comunes en matrices poliméricas por su fácil obtención a partir de tallos, hojas, semillas, entre otras (Rajeshkumar et al., 2021).

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Figura 2

## Fibras Naturales



*Nota.* Visión general de la clasificación de las fibras naturales. Tomado de *Classification of natural fibers*, de *Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review*, 2015 ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)).

### 3. Materiales y equipos

Ahora se realiza la descripción general de los elementos utilizados para el desarrollo de la fase práctica del proyecto, resaltando las características más importantes de cada uno.

#### 3.1. Materiales

Materia prima empleada, fabricante y especificaciones.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

### 3.1.1. *Ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA, por sus siglas en inglés) peletizado*

El PLA utilizado inicialmente, consistió en material en forma de pellets como se muestra en la Figura 3. Para efectos de manipulación, la materia prima se empacó al vacío en presentaciones de 1 kg. A continuación, se muestran algunos de los datos suministrados por el fabricante, Tabla 1 (ver Anexo A).

**Tabla 1**

*Especificaciones del PLA*

<b>Especificaciones del PLA</b>	
Fabricante	Nature Works
Nombre del producto	Ingeo biopolymer
Código de producto	2003D
Densidad	1.25 g/cm <sup>3</sup>
Punto de fusión	150-180°C
Temperatura de transición vítrea	55-60°C

**Figura 3**

*Pellets de PLA*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

### 3.1.2. *Ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA, por sus siglas en inglés) para impresión 3D*

Presentación en un carrete de aproximadamente 1 Kg de material (filamento continuo) empacado en bolsa plástica sellada. En la Figura 4, se observa la etiqueta del producto y en la Tabla 2, las especificaciones generales.

**Tabla 2**

*Especificaciones del filamento de PLA*

ESPECIFICACIONES DEL FILAMENTO DE PLA	
Fabricante	INLAND
Calibre	1.75 mm
Temperatura de impresión	205-225 °C
Composición	PLA

**Figura 4**

*(a) Especificaciones del filamento de PLA*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**3.1.3. Hilo de algodón**

El algodón usado, se obtuvo de una bobina de hilo para aplicación industrial de 100% algodón. A continuación, se presentan los datos obtenidos correspondientes al hilo.

**Tabla 3**

*Especificaciones del hilo de algodón.*

<b>ESPECIFICACIONES DEL HILO DE ALGODÓN</b>	
Fabricante	ANTAR PLUS El universo del hilo Ltda.
Calibre	40/2 – 120
Longitud de la bobina	5000 Y (4572 metros)
Composición	100% algodón

**Figura 5**

*Etiqueta fabricante*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

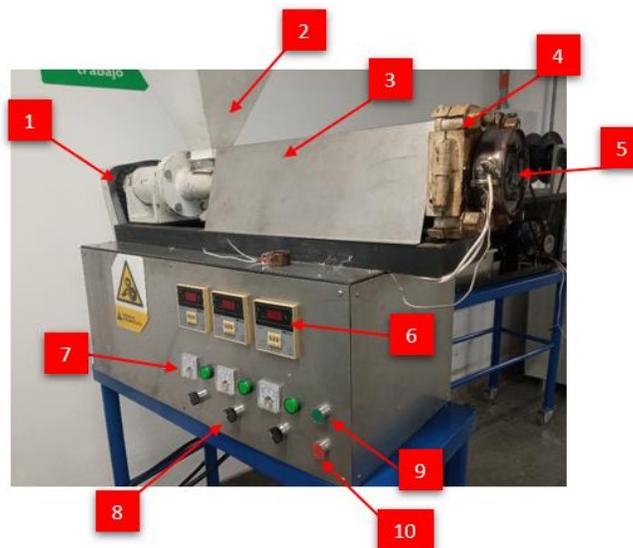
**3.2. Equipos****3.2.1. Máquina extrusora.**

Para obtener el PLA como filamento, se usó la máquina extrusora que se muestra en la Figura 6. (a) Se enumeran los componentes generales. (b) Distribución de las resistencias (R1/R2/R3) sobre la camisa. (c) Variador de frecuencia MOVITRAC LT que se ubica en la parte inferior del equipo.

La máquina cuenta con un motor y un reductor ubicados en la zona cubierta.

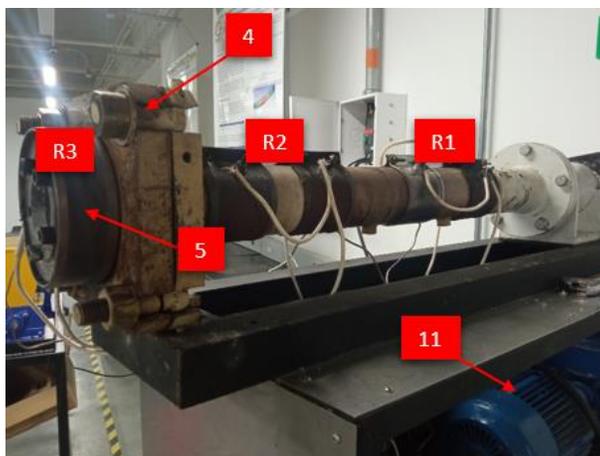
**Figura 6**

*(a) Máquina extrusora (b) Distribución de las resistencias (c) Variador de velocidad*



(a)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA



(b)



(c)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 4***Componentes de la máquina extrusora*

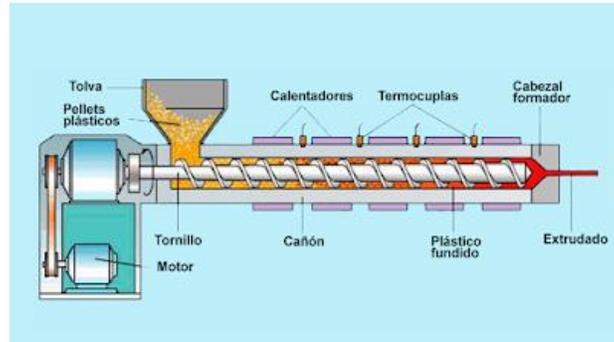
<b>Componentes de la máquina extrusora</b>	
<b>Ítem</b>	<b>descripción</b>
<b>1</b>	Mecanismo de transmisión por cadena
<b>2</b>	Tolva de alimentación
<b>3</b>	Cubierta del área de calentamiento
<b>4</b>	Dado de salida
<b>5</b>	Boquilla de extrusión
<b>6</b>	Indicadores del valor de temperatura y control manual de la temperatura (x3)
<b>7</b>	Indicadores de pulsos e indicadores de luz para las resistencias encendidas
<b>8</b>	Accionadores ON/OFF de las resistencias
<b>9</b>	Accionador ON del variador del motor
<b>10</b>	Accionador OFF del variador del motor
<b>11</b>	Motor

En la Figura 7, se observa de forma esquemática el funcionamiento interno de la extrusora.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 7**

*Esquema interno de la extrusora*



*Nota.* Esquema interno de una extrusora de tornillo. Tomada de Partes de una extrusora, Proceso de extrusión del PVC, 2021, (<https://elprocesodeextrusiondepvc.blogspot.com/>).

### 3.2.2. Impresora 3D

El equipo que se utilizó para la fabricación de las probetas fue una impresora 3D de marca ARTILLERY, modelo GENIUS, ver Figura 8. Algunas características importantes de la impresora son:

Velocidad máxima de impresión de 150 mm/s

Resolución de capa desde 0.05 mm

Diámetro de filamento de hasta 1.75 mm

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

### Figura 8

*Impresora 3D. ARTILLERY, Genius*



### 3.2.3. Sistema de pruebas MTS para ensayos de tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados en la prensa hidráulica MTS Bionix, Model 370.02 Axial. Que permite realizar pruebas a  $\pm 25$  kN, con desplazamientos de  $\pm 50$  mm. Figura 9.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 9**

MTS Bionix. Tabletop Test System

**3.2.4. Extensómetro axial MTS.**

Usado para medir el cambio de la longitud o extensión de una probeta al aplicar una carga,

Figura 10. En la Tabla 5 se presentan las características del extensómetro utilizado.

**Tabla 5**

*Especificaciones del extensómetro axial MTS.*

<b>ESPECIFICACIONES EXTENSÓMETRO</b>	
<b>Fabricante</b>	MTS
<b>Referencia</b>	634.12F-25
<b>Longitud calibrada</b>	25 mm
<b>Fuerza de activación</b>	55 g

**Figura 10***Extensómetro MTS***4. Cuerpos de prueba y procedimientos de obtención.**

Sección compuesta por la descripción de los métodos o procedimientos empleados para obtener el material de prueba (filamentos y probetas) y la evidencia de los cuerpos finales junto con las medidas o dimensiones correspondientes.

**4.1. Filamento de PLA puro obtenido por extrusión**

El hilo de PLA puro se obtuvo por el método de extrusión. Para esto se usó la extrusora mencionada en el numeral 3.2.1. Las temperaturas fueron seleccionadas próximas a la temperatura de fusión del material, pero manteniéndose dentro del rango de trabajo de este, es decir, entre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de fusión reportadas por el fabricante (ver Anexo A). Lo anterior, con el fin de garantizar que las propiedades mecánicas no se vieran afectadas durante la extrusión. El valor de configuración del variador de frecuencia se determinó de acuerdo con los requerimientos identificados durante el proceso de extrusión.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Los parámetros de trabajo se configuraron de la siguiente manera, ver Tabla 6 y Figura 11.

**Tabla 6**

*Configuración de parámetros para extrusión del filamento de PLA puro*

CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA EXTRUSIÓN FILAMENTO DE PLA	
<b>Temperatura resistencia R1</b>	143°C
<b>Temperatura resistencia R2</b>	145°C
<b>Temperatura resistencia R3</b>	161°C
<b>Variador de frecuencia</b>	730 rpm

**Figura 11**

*Temperaturas de trabajo para el proceso de extrusión*



En la Figura 12 se observa el momento de extracción del filamento de PLA.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

### Figura 12

#### *Extracción de filamento de PLA*



En cuanto fue extraído el filamento de la boquilla, se pasó por una piscina con agua precalentada (Figura 13) a una temperatura aproximada de 45°C, para disminuir el gradiente de enfriamiento del material.

### Figura 13

#### *Piscina de agua precalentada*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Al tener la totalidad del filamento extruido, se realizó la revisión de éste y se seleccionaron las secciones más uniformes, sin marcas superficiales, de diámetro útil para el proceso de impresión 3D y que no presentaran alta fragilidad. Figura 14.

### **Figura 14**

*Filamento de PLA seleccionado para prueba de tracción e impresión 3D*



Para los cuerpos de prueba, se seleccionaron los tramos con el diámetro más uniforme, Tabla 7. La longitud de los cuerpos de prueba o filamentos para el ensayo de tracción fue de 100 mm de los que se marcaron 12 mm en cada extremo para la sección de agarre de las mordazas, esta medida se obtuvo a partir de la norma ASTM D3822. Finalmente, se prepararon 14 tramos de los que se descartaron 4 por tener marcas superficiales y se aprobaron 10 tramos para la realización del ensayo, Figura 15.

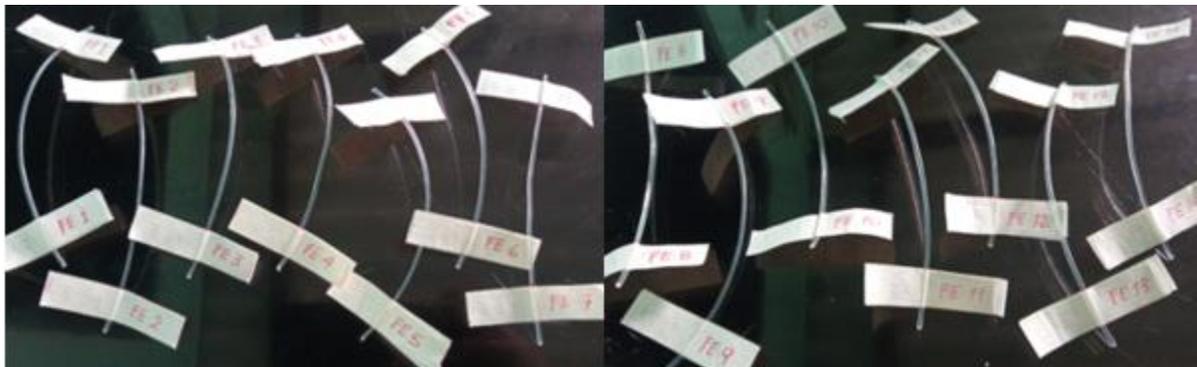
## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 7***Características de los filamentos de PLA obtenido por extrusión*

<b>Filamentos de PLA por extrusión</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>
FE-1	100	1.30
FE-2	100	1.26
FE-3	100	1.37
FE-4	100	1.39
FE-5	100	1.24
FE-6	100	1.40
FE-7	100	1.28
FE-8	100	1.60
FE-9	100	1.39
FE-10	100	1.33
FE-11	100	1.42
FE-12	100	1.49
FE-13	100	1.38
FE-14	100	1.52

**Figura 15**

*Cuerpos de prueba de PLA extruido para ensayo de tracción*



#### 4.2. Filamento de PLA puro comercial para impresión 3D.

Los tramos seleccionados para el ensayo de tracción fueron preparados de acuerdo con la norma ASTM D3822, con las dimensiones que se indican en la Tabla 8. De los filamentos obtenidos, se aprobaron 10 tramos para realizar el ensayo de tracción, los 4 tramos restantes se descartaron por presentar marcas superficiales.

**Tabla 8**

*Características de los filamentos de PLA comercial para impresión 3D*

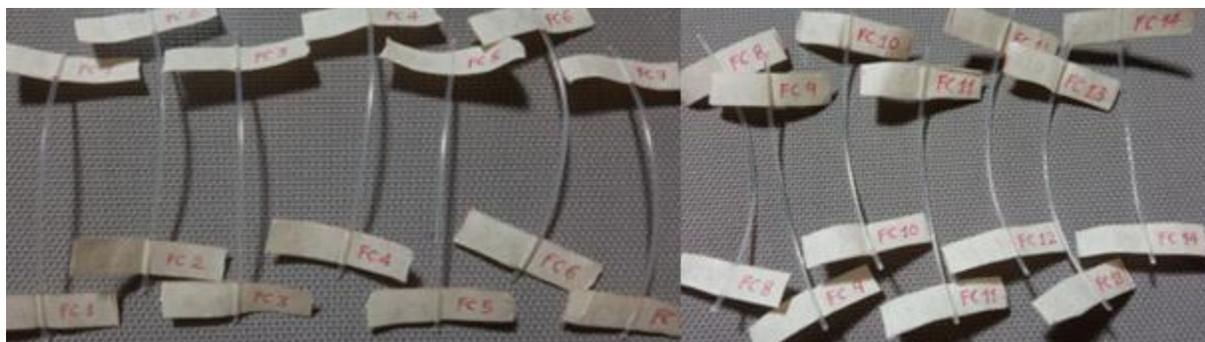
Filamentos de PLA comercial		
Nombre	Longitud (mm)	Diámetro (mm)
FC-1	100	1.74
FC-2	100	1.74
FC-3	100	1.75
FC-4	100	1.74
FC-5	100	1.75

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Nombre	Longitud (mm)	Diámetro (mm)
FC-6	100	1.76
FC-7	100	1.75
FC-8	100	1.76
FC-9	100	1.74
FC-10	100	1.75
FC-11	100	1.75
FC-12	100	1.74
FC-13	100	1.74
FC-14	100	1.76

**Figura 16**

*Cuerpos de prueba de PLA comercial para ensayo de tracción*



#### 4.3. Filamento de PLA con refuerzo.

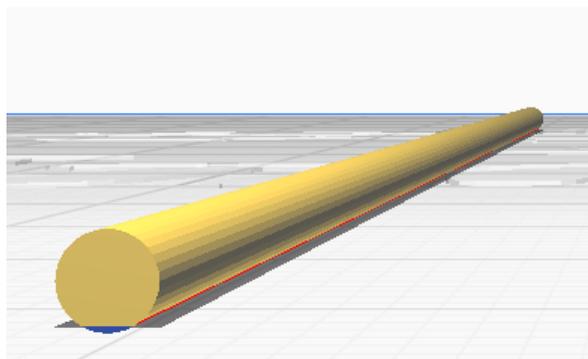
Para el hilo compuesto, se utilizó el PLA como matriz y como refuerzo se utilizó fibra continua de algodón. La fabricación fue realizada por el método de manufactura aditiva, para lo que fue necesario tener en cuenta las temperaturas de trabajo para las fibras de algodón (límite de temperatura menor a 150°C). Inicialmente se realizó en SolidWorks un cilindro con diámetro de 1.75 mm y longitud de 110 mm, que posteriormente se pasó en formato STL al software de

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

impresión 3D Ultimaker Cura, Figura 17. La configuración del software de impresión se indica en la Tabla 9.

**Figura 17**

*Filamento en software de impresión 3D Ultimaker Cura*



**Tabla 9**

*Parámetros importantes de impresión.*

Configuración de impresión	
Parámetro	Valor
Altura de capa	0.22 mm
Ancho de línea	0.6 mm
Ancho de línea de la capa inicial	100%
Grosor de la pared	1.2 mm
Alineación de costuras en Z	Esquina más pronunciada
Grosor superior/inferior	0.88 mm
Capas superiores	2
Capas inferiores	2
Patrón superior/inferior	Líneas
Densidad de relleno	100%

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

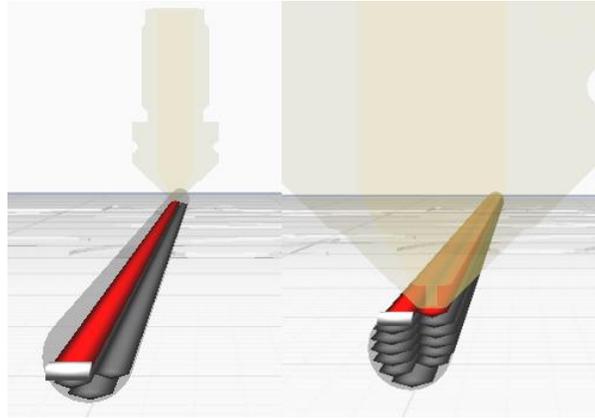
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Distancia de línea de relleno	0.6 mm
Patrón de relleno	Líneas
Grosor de la capa de relleno	0.22 mm
Temperatura de impresión	210 °C
Temperatura de la cama de impresión	60 °C
Flujo	100%
Velocidad de impresión	70 mm/s
Velocidad de pared	35 mm/s
Velocidad de desplazamiento	175 mm/s
Velocidad de capa inicial	20 mm/s
Distancia de retracción	7 mm
Velocidad de retracción	25 mm/s
Altura de salto en Z	0.2 mm
Resolución máxima	0.25 mm
Número de capas de impresión	8

En la Figura 18, se presenta el relleno tipo línea, y la secuencia en que se aplica, siendo una capa compuesta por dos pasos de la boquilla como se indica en la figura. El filamento de refuerzo fue ubicado en la mitad de la impresión, es decir, sobre la capa número 4.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 18**

*Secuencia de impresión del filamento en una misma capa*



En la Figura 19 se observa el filamento de material compuesto obtenido.

**Figura 19**

Filamento de PLA con fibra continua de algodón como refuerzo



Una vez se obtuvieron los hilos extruidos se verificaron las dimensiones de estos, de forma que cumplieran con los parámetros requeridos por la norma ASTM D-3822. En total, se fabricaron 14 unidades de filamento compuesto, de las que se rechazaron 4 unidades por

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

presentar marcas de corte producidas al retirar el material de la cama de impresión, las 10 unidades restantes, se aprobaron para realizar el ensayo de tracción.

**Tabla 10**

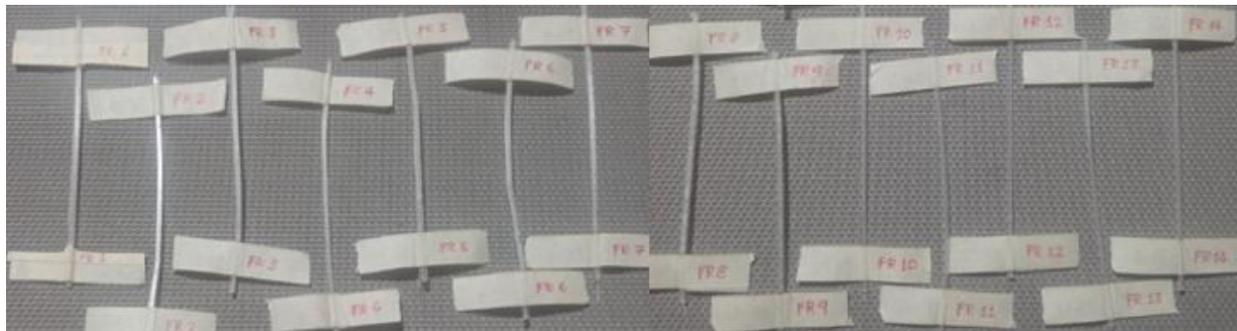
*Características de los filamentos de PLA con refuerzo.*

<b>Filamentos de PLA con refuerzo</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>
FR-1	100	1.76
FR-2	100	1.36
FR-3	100	1.49
FR-4	100	1.78
FR-5	100	1.39
FR-6	100	1.42
FR-7	100	1.60
FR-8	100	1.56
FR-9	100	1.47
FR-10	100	1.35
FR-11	100	1.75
FR-12	100	1.47
FR-13	100	1.75
FR-14	100	1.65

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

### Figura 20

*Cuerpos de prueba de PLA con refuerzo para prueba de tracción*

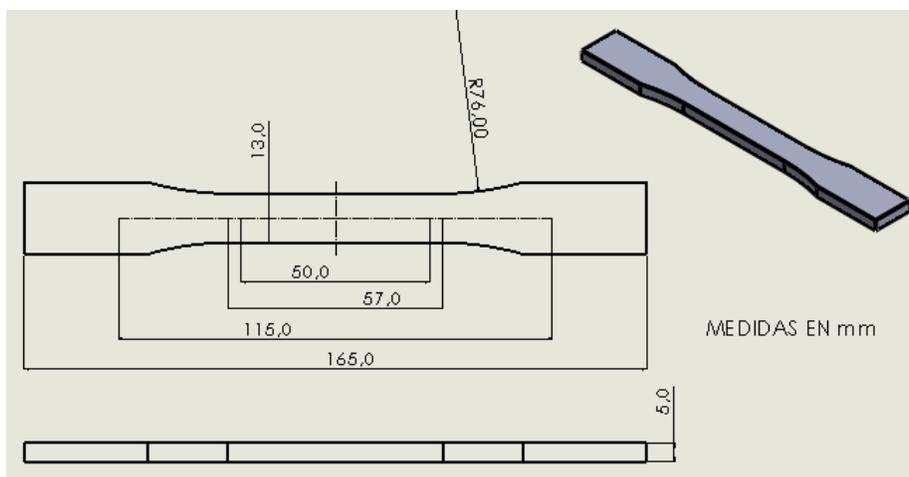


#### 4.4. Probeta de PLA puro obtenida por FDM.

Para la fabricación y dimensionamiento de las probetas, se utilizó como guía de trabajo, la norma ASTM D-638-14, tomando el material como un compuesto reforzado, por lo que se eligió la probeta Tipo I. El modelado de la probeta fue realizado en Solidworks, con las dimensiones presentadas en la Figura 21.

### Figura 21

*Dimensiones de la probeta de tracción*

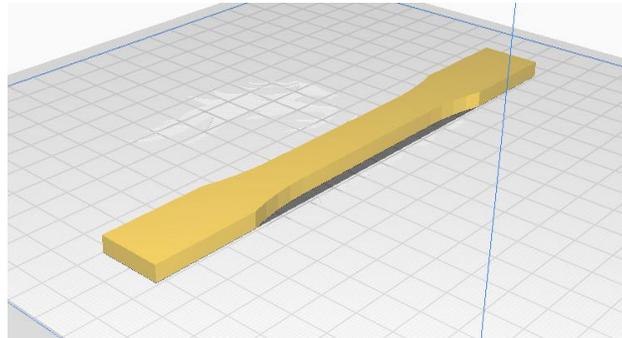


## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Posteriormente, el modelo se exportó en formato STL al software Ultimaker CURA de impresión 3D. Figura 22.

### Figura 22

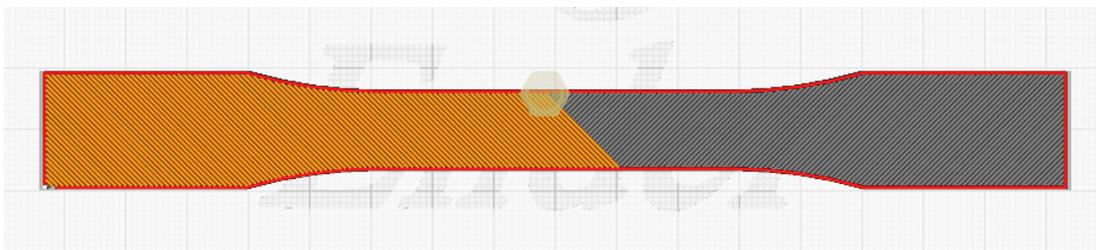
Probeta en software de impresión 3D Ultimaker Cura



La configuración de impresión se definió de acuerdo con los requerimientos considerados fundamentales para garantizar la mayor resistencia posible y la correcta adhesión entre capas. En la Tabla 9, sección 4.3., se presentan los parámetros más relevantes con los que se realizó la impresión de la totalidad de las probetas, cambiando el número de capas que para este caso fue de 23, y definiendo el tipo de relleno como de líneas cruzadas, Figura 23.

### Figura 23

*Tipo de relleno de las probetas*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Se fabricaron 8 probetas de PLA puro (Figura 24), 6 unidades bajo la configuración indicada en la Tabla 9, con relleno de líneas cruzadas, 1 unidad variando el ángulo de orientación de la impresión para que coincidiera con el eje de aplicación de la carga (Probeta #1) y 1 unidad variando las capas de funda (Probeta #2), Figura 25.

### Figura 24

*Impresión de probetas de PLA puro*



### Figura 25

*Probetas de PLA puro*



Finalmente se realizó una inspección de los cuerpos de prueba para identificar posibles irregularidades que afectarían los ensayos, se verificaron y validaron las dimensiones de acuerdo

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

con la norma de trabajo. Las probetas que cumplieron fueron aprobadas para realizar el ensayo de tracción.

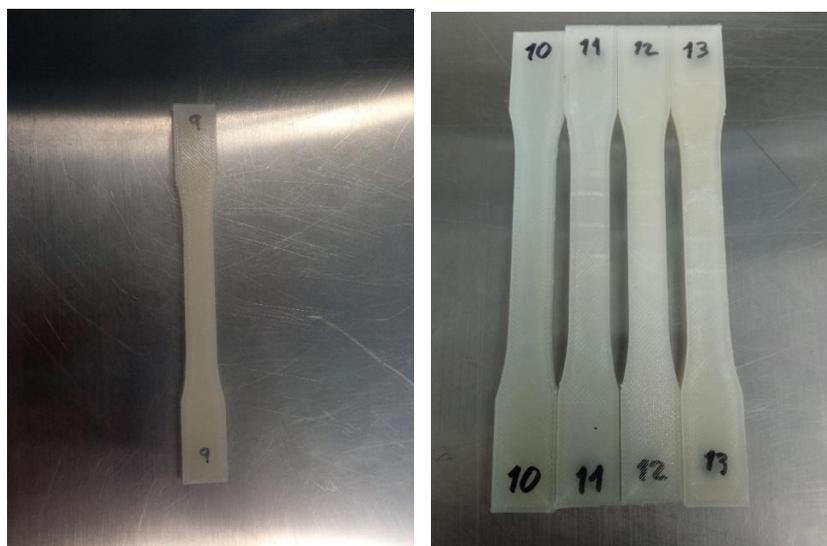
### 4.5. Probeta de PLA puro comercial para impresión 3D

El procedimiento realizado para la impresión de las probetas fue el descrito en la sección 4.4. Las dimensiones se obtuvieron de la norma ASTM D-638-14., asumiendo la probeta como Tipo I. El modelado en SolidWorks y la conversión al software de impresión Cura, se observan en la Figura 21, Figura 22 y Figura 23 respectivamente. Los parámetros de configuración de la impresora se pueden observar en la Tabla 9, sección 4.3.

Se fabricaron 5 probetas de este material, Figura 26. Se verificaron las dimensiones finales y se aprobaron para realizar el ensayo de tracción.

### Figura 26

*Probetas de PLA puro comercial para impresión 3D (a) Probeta N°9 (b) Probetas N°10, 11, 12 y 13*



(a)

(b)

#### 4.6. Probeta de PLA con refuerzo obtenida por FDM

La fabricación de las probetas se realizó con PLA comercial para impresión 3D y como guía de trabajo la norma ASTM D-638-14, tomando el material como un compuesto reforzado, por lo que se seleccionó la probeta Tipo I. El proceso de modelado en SolidWorks y la conversión al software de impresión Cura, se describen en la sección 4.4, Figura 21, Figura 22 y Figura 23. Los parámetros de configuración de la impresora se pueden observar en la Tabla 9, sección 4.3.

Se definieron 3 porcentajes diferentes de refuerzo, correspondientes al 13%, 27% y 40% adicional de la masa de las probetas de PLA puro comercial (15g). (1).

$$\% \text{ de refuerzo} = \frac{\text{Masa de refuerzo (g)}}{\text{Masa inicial de la probeta (g)}} \quad (1)$$

Para el ensayo se fabricaron 5 cuerpos de prueba por cada porcentaje seleccionado. El material de refuerzo (sección 3.1.3), se posicionó sobre determinadas capas de PLA, como se observa en la Figura 27. Buscando que las fibras quedaran distribuidas en el centro de las probetas con una orientación longitudinal y paralela al eje de aplicación de la carga, Figura 28. Características adicionales se presentan en la Tabla 11.

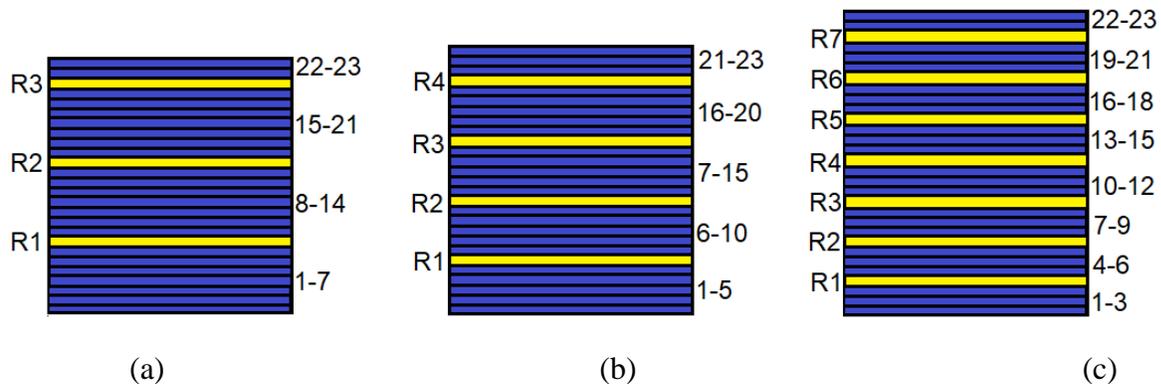
**Tabla 11**

*Características de las probetas de PLA con refuerzo.*

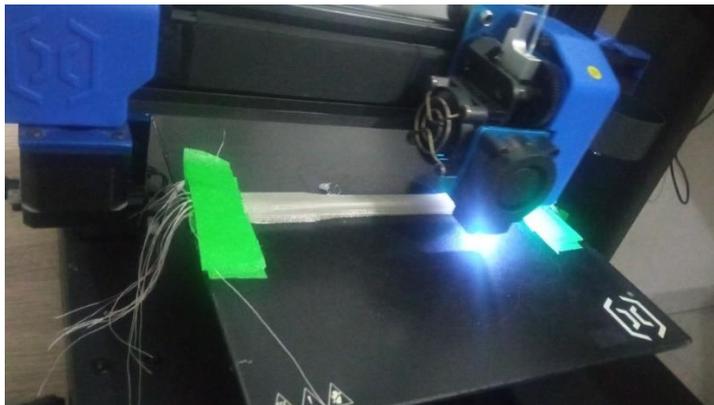
<b>Probetas con refuerzo</b>			
<b>Porcentaje de masa de refuerzo (%)</b>	13	27	40
<b>Capas totales</b>	26	27	30
<b>Capas de refuerzo</b>	3	4	7
<b>Peso (g)</b>	17	19	21
<b>Número de probetas</b>	5	5	5

**Figura 27**

*Representación de capas de refuerzo (Amarillo) sobre las capas de PLA (Azul), (a) 13%, (b) 27% (c) 40%*

**Figura 28**

*Impresión de las probetas de PLA con refuerzo*



Al obtener la totalidad de las probetas, se verificaron las dimensiones y se realizó una inspección superficial de estas, para su aprobación y posterior ejecución del ensayo de tracción. En la Figura 29 se observan las probetas con refuerzo.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Figura 29

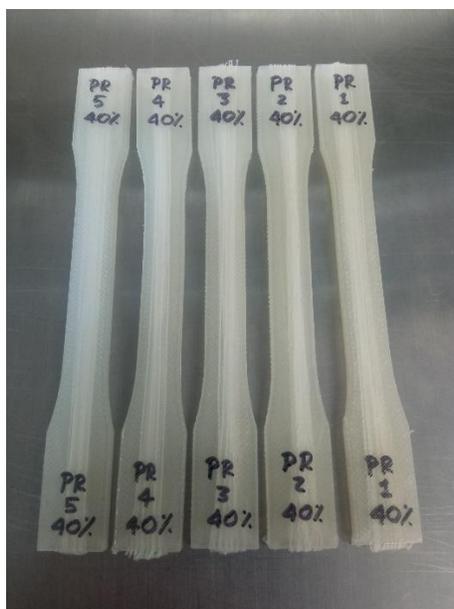
Probetas de PLA con refuerzo (a) 13%, (b) 27%, (c) 40%



(a)



(b)



(c)

## 5. Ensayo mecánico de tracción.

A continuación, se describe el ensayo realizado, inicialmente para los filamentos, seguido de las probetas. Se mencionan los cuerpos seleccionados y las velocidades de prueba. Se resalta que no fue posible controlar las condiciones atmosféricas bajo las cuales se realizó el ensayo de tracción, por ende, se estima un valor de temperatura ambiente a presión atmosférica de la ciudad local.

### 5.1. Ensayo mecánico de tracción para los filamentos de PLA puro y de PLA con refuerzo

El procedimiento para ensayar los cuerpos de prueba fue similar para los tres tipos de filamentos. En la Tabla 12 se presentan los cuerpos seleccionados para realizar el ensayo.

**Tabla 12**

*Filamentos seleccionados para el ensayo de tracción*

<b>Filamentos seleccionados para el ensayo de tracción</b>		
<b>Filamento extruido</b>	<b>Filamento comercial</b>	<b>Filamento con refuerzo</b>
FE-1	FC-5	FR-1
FE-2	FC-6	FR-2
FE-3	FC-7	FR-3
FE-4	FC-8	FR-4

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Filamento extruido	Filamento comercial	Filamento con refuerzo
FE-5	FC-9	FR-7
FE-6	FC-10	FR-8
FE-7	FC-11	FR-9
FE-8	FC-12	FR-10
FE-9	FC-13	FR-11
FE-10	FC-14	FR-12

Como paso siguiente, se definió la fuerza de agarre de las mordazas superior e inferior, Figura 30, con el objetivo de que no dañaran el filamento, el cual fue protegido en sus extremos con cinta y papel tipo cartón. También se estableció la velocidad de prueba como se indica en la Tabla 13.

**Figura 30**

*Fuerza de las mordazas de la prensa hidráulica*



**Tabla 13***Configuración de la prensa hidráulica MTS*

<b>Configuración prensa hidráulica MTS</b>	
Fuerza de agarre mordaza superior	100 psi
Fuerza de agarre mordaza inferior	100 psi
Velocidad de prueba	2 mm/min

Una vez se definieron los parámetros involucrados, se realizó el montaje de los filamentos en la prensa hidráulica para el ensayo de tracción, Figura 31.

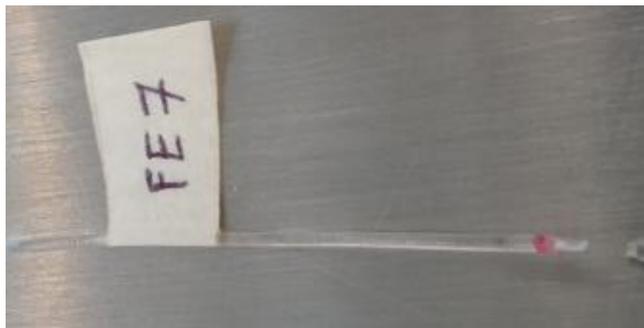
**Figura 31***Ensayo de tracción de los filamentos seleccionados*

Al finalizar la prueba, los filamentos fueron retirados del equipo y almacenados para su análisis. En la Figura 32, se presenta una muestra de cada tipo de filamento evaluado. Los datos obtenidos se procesaron y son mostrados en la sección 8, correspondiente a los resultados.

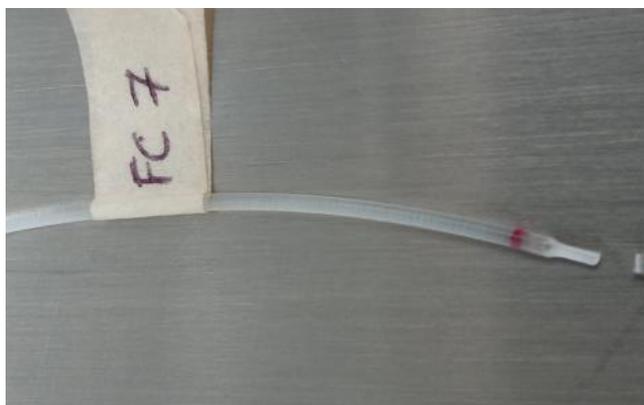
## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 32**

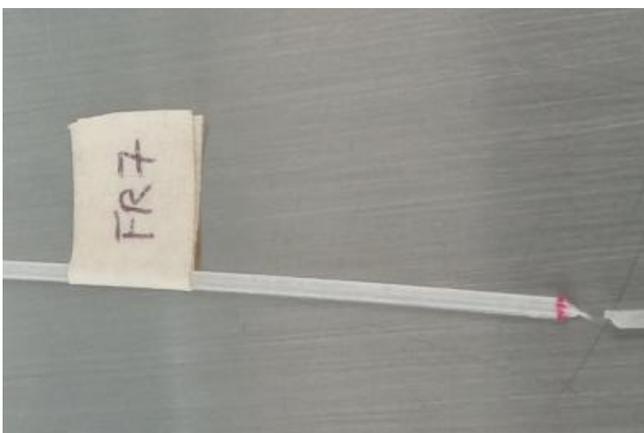
*Filamento con fractura (a) PLA puro extruido (b) PLA puro comercial (c) PLA con refuerzo*



(a)



(b)



(c)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**5.2. Ensayo mecánico de tracción para las probetas de PLA puro y PLA con refuerzo.**

El procedimiento para ensayar las probetas tanto de PLA puro extruido, PLA puro comercial y de PLA con refuerzo, fue similar en los tres casos. En la Tabla 14 se presentan las probetas seleccionadas para realizar el ensayo de tracción (5 unidades por cada material).

**Tabla 14**

*Probetas seleccionadas para el ensayo de tracción.*

Probetas de pla puro seleccionadas para el ensayo de tracción				
PLA puro extruido	PLA puro comercial	PLA con refuerzo de algodón		
		Refuerzo de 13%	Refuerzo de 27%	Refuerzo de 40%
P3	P9	PR1 13%	PR1 27%	PR1 40%
P5	P10	PR2 13%	PR2 27%	PR2 40%
P6	P11	PR3 13%	PR3 27%	PR3 40%
P7	P12	PR4 13%	PR4 27%	PR4 40%
P8	P13	PR5 13%	PR5 27%	PR5 40%

Inicialmente se definió la fuerza de agarre de la mordaza superior e inferior, Figura 33. Después se estableció la velocidad de la prueba como se indica, Tabla 15.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 33***Fuerza de las mordazas de la prensa hidráulica***Tabla 15***Configuración de la prensa hidráulica MTS*

<b>Configuración prensa hidráulica MTS</b>	
Fuerza de agarre mordaza superior	400 psi
Fuerza de agarre mordaza inferior	400 psi
Velocidad de prueba	5 mm/min

Una vez se definieron los parámetros involucrados, se realizó el montaje de las probetas en la prensa hidráulica para el ensayo de tracción, Figura 34.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 34**

*Ensayo de tracción de las probetas seleccionadas*



Al finalizar la prueba, las probetas fueron retiradas del equipo y almacenadas para su análisis. En la Figura 35, se presentan las probetas evaluadas después de realizado el ensayo de tracción. Los datos obtenidos se procesaron y son mostrados en la sección 8, correspondiente a los resultados.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Figura 35

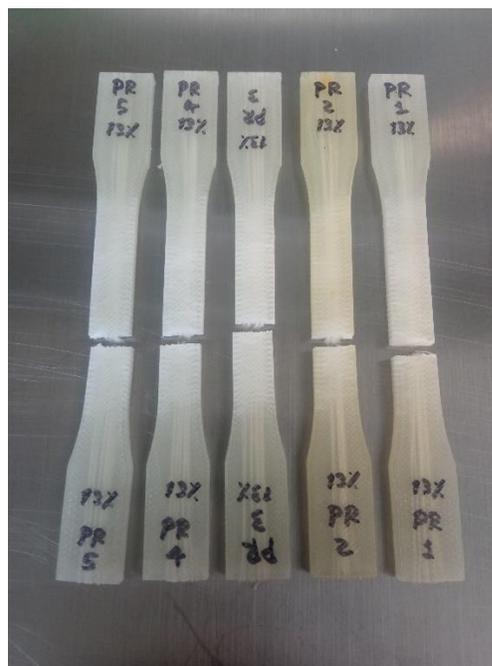
Probetas fracturadas (a) PLA puro extruido, (b) PLA puro comercial, (c) PLA con refuerzo de 13%, (d) PLA con refuerzo de 27%, (e) PLA con refuerzo de 40%



(a)

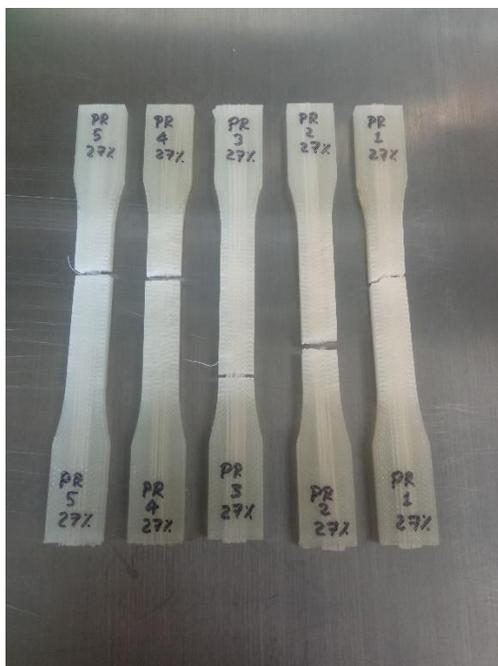


(b)



(c)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA



(d)



(e)

## 6. Resultados

A continuación, se describe el método utilizado para determinar el valor correspondiente del Módulo de Young, presentando en conjunto las gráficas de Esfuerzo vs. Deformación y una tabla de los valores obtenidos para cada grupo de muestras ensayado.

### 6.1. Filamentos de PLA puro y con refuerzo

A partir de los datos (Fuerza [N] y Alargamiento [mm]) entregados por la máquina de ensayos MTS Bionix Tabletop Test System, se calcularon los valores de Esfuerzo [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] (2) y Deformación unitaria [ $\text{mm}/\text{mm}$ ] (3) para realizar la gráfica correspondiente.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (3)$$

En donde:

$\sigma$ : Esfuerzo [MPa]

$P$ : Fuerza aplicada [N]

$A$ : Área de la sección transversal de aplicación de la fuerza [mm<sup>2</sup>]

$\varepsilon$ : Deformación unitaria

$\delta$ : Variación de la longitud ( $L_f - L_0$ )

$L_0$ : Longitud inicial calibrada

De dicha gráfica, se determinan los valores de Módulo de Young (4), Esfuerzo máximo y Deformación bajo la acción del esfuerzo máximo.

A partir de la Ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

En donde:

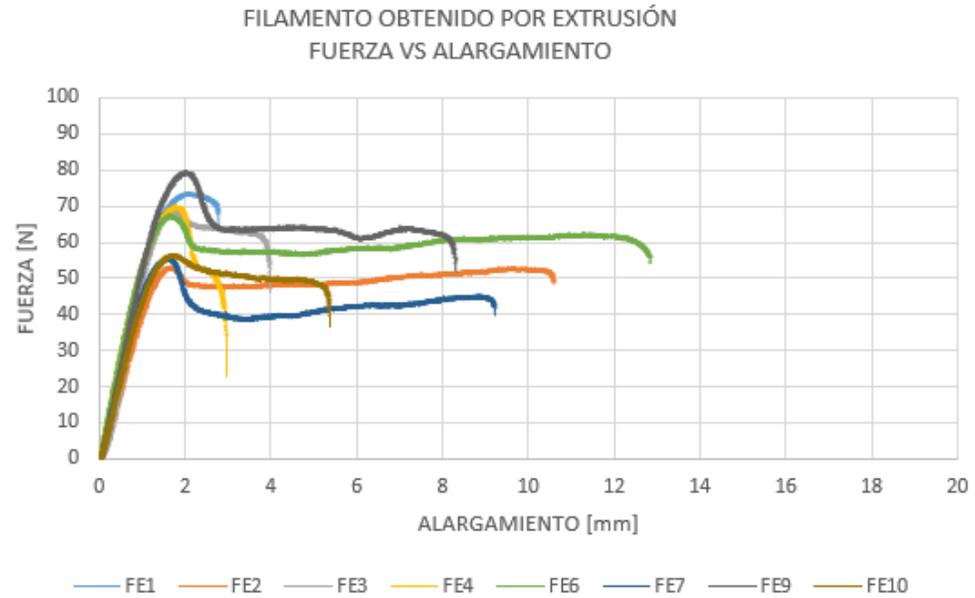
$E$ : Módulo de elasticidad o Módulo de Young

En la Figura 36 y 37 se presentan las gráficas Fuerza vs Alargamiento y Esfuerzo vs Deformación unitaria, para cada grupo de filamentos evaluados.

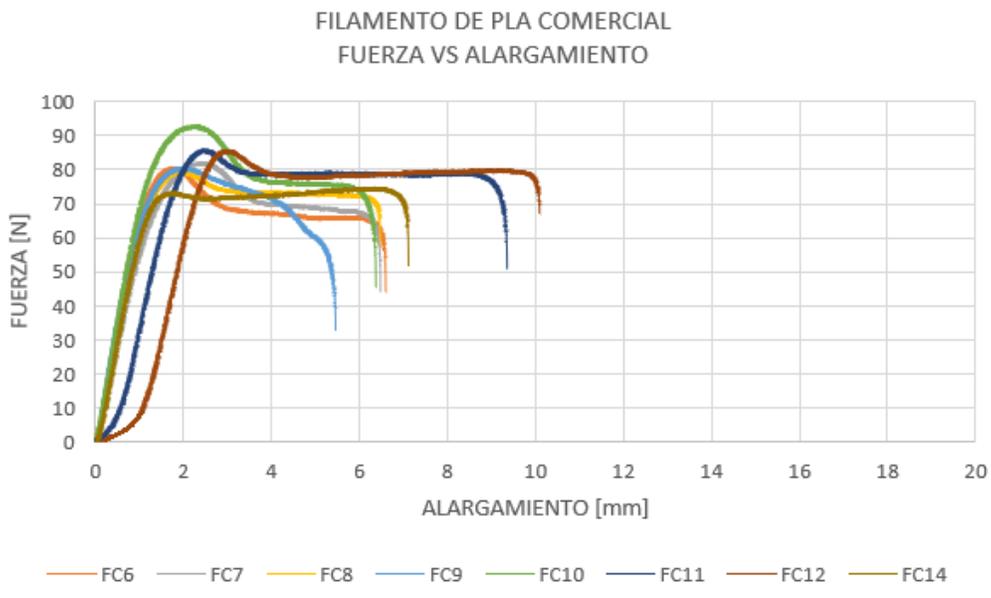
PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Figura 36

Fuerza vs Alargamiento de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con fibra continua de refuerzo

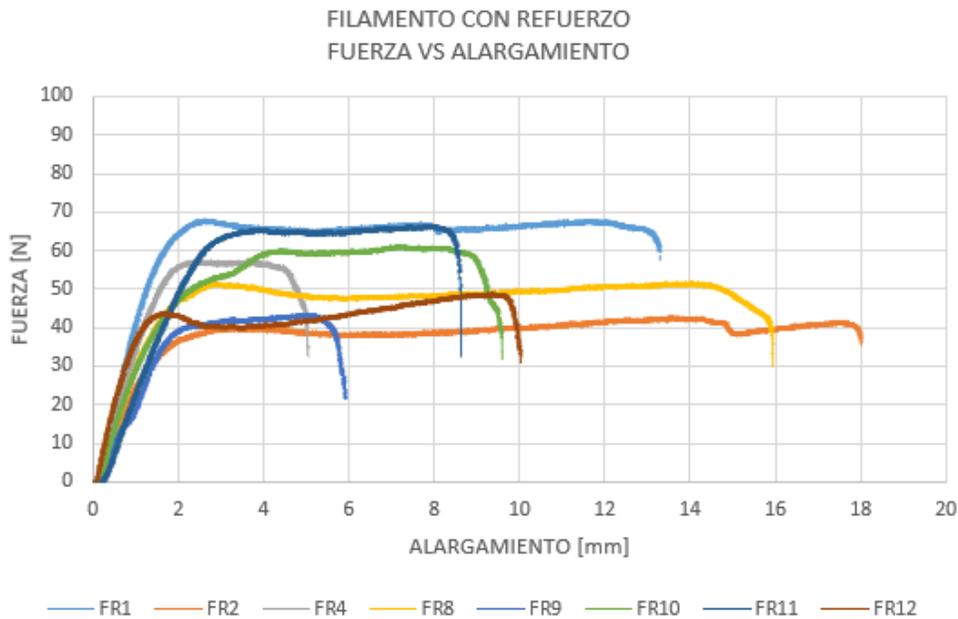


(a)



(b)

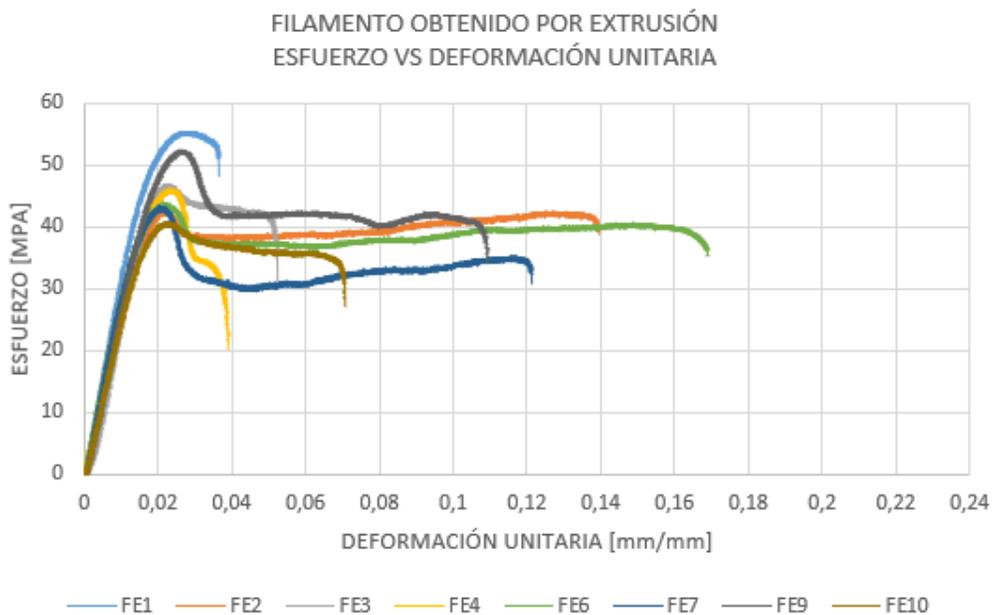
## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA



(c)

**Figura 37**

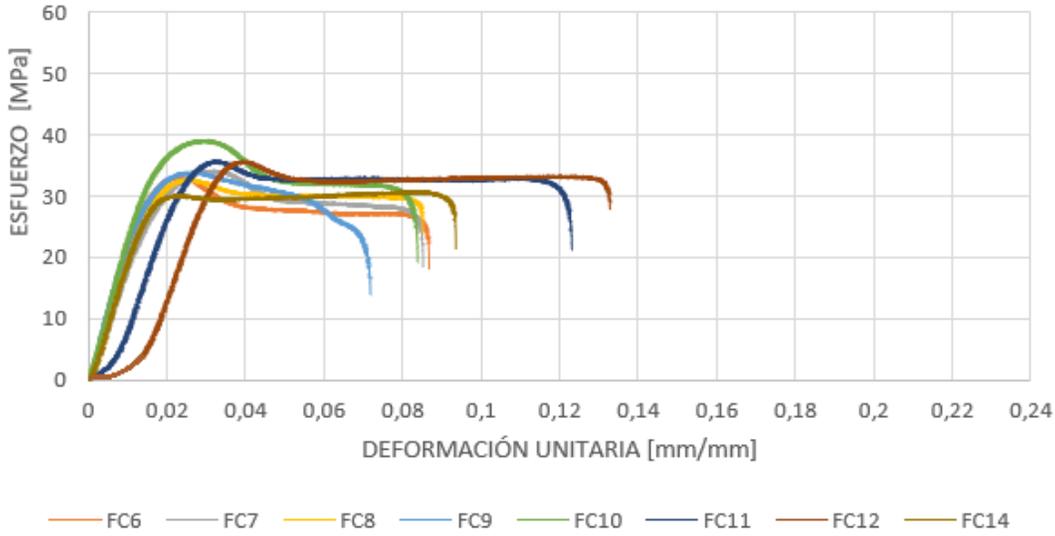
*Esfuerzo vs Deformación unitaria de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con fibra continua de refuerzo*



(a)

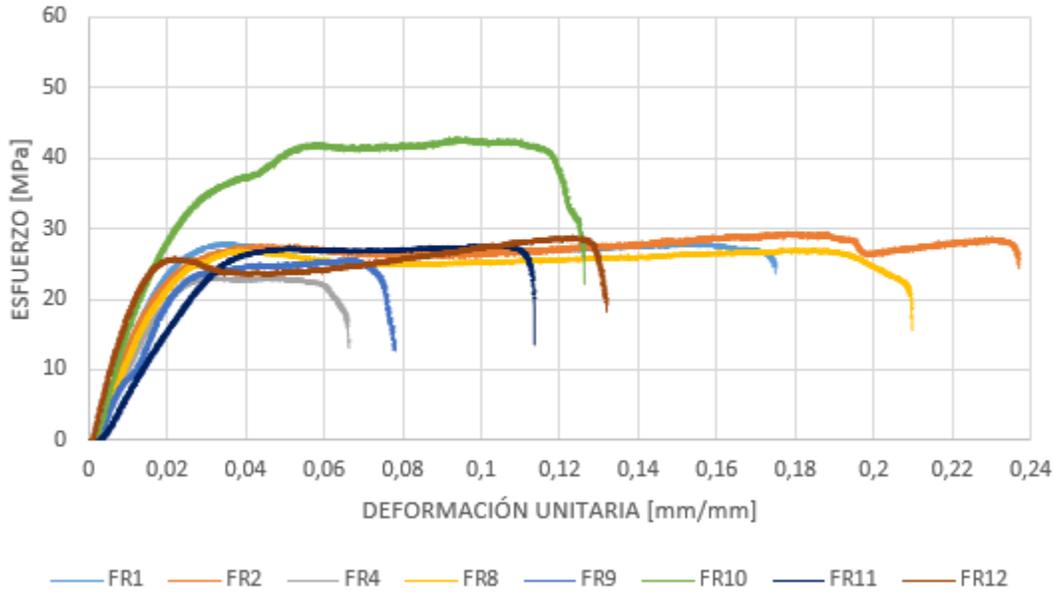
PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

FILAMENTO DE PLA COMERCIAL  
ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA



(b)

FILAMENTO CON REFUERZO  
ESFUERZO VS DEFORMACIÓN



(c)

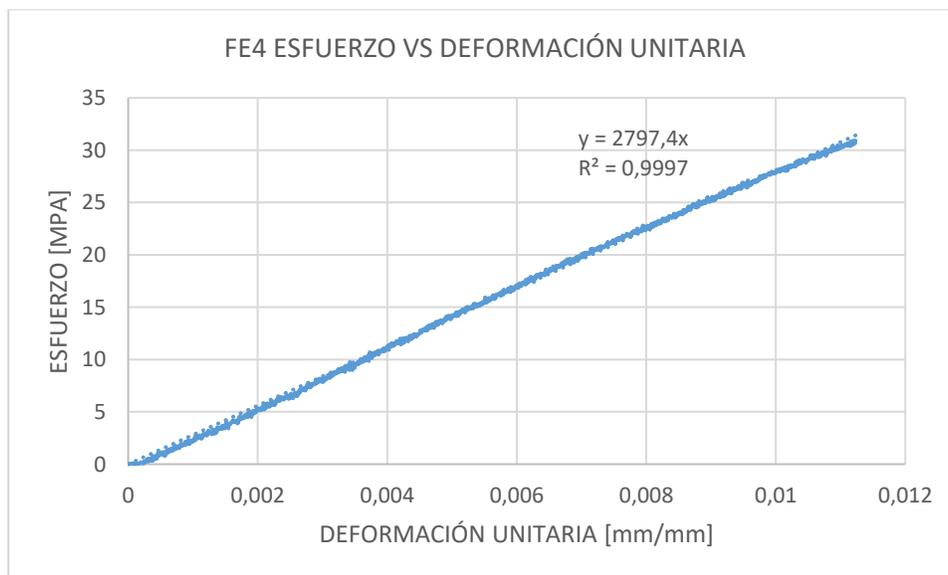
Con el fin de obtener el Módulo de Young, y conociendo que este corresponde a la pendiente de la sección recta de la gráfica que representa la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, se realizó una regresión lineal sobre cada una de las gráficas, limitando los datos

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

de trabajo para ajustar dicha regresión a la zona elástica del material. Una vez logrado esto, se obtuvo la ecuación de la recta graficada cuya pendiente corresponde al valor del Módulo de elasticidad o Módulo de Young. Junto a la ecuación de dicha recta se presenta la desviación estándar, para conocer la precisión que tiene la dispersión de los datos con respecto a la ecuación de la recta. En la Figura 38 se muestra el procedimiento para el cálculo del Módulo de Young del filamento de PLA obtenido por extrusión. En la Figura 39, se grafica la zona elástica de los 8 filamentos obtenidos por extrusión, con el fin de determinar y validar los resultados promedio correspondientes.

**Figura 38**

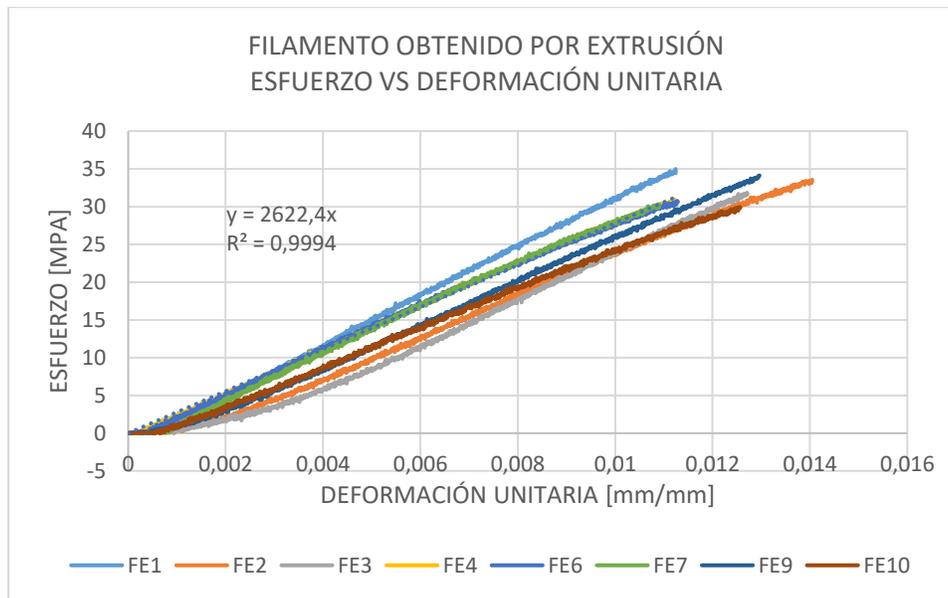
*Zona elástica del filamento FE-4*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 39**

*Zona elástica de los filamentos obtenidos por extrusión*



El valor del esfuerzo máximo y deformación se determinaron a partir de los datos calculados y de su respectivo contraste con la gráfica Esfuerzo vs. Deformación unitaria. En la Tabla 16, se muestran los resultados generales para los filamentos extruidos (FE) evaluados. Para una mayor confiabilidad de los datos obtenidos, se descartaron las probetas correspondientes al valor máximo y mínimo de la deformación (FE-5 y FE-8 respectivamente), puesto que en dichos datos se presentaba el mayor rango de diferencia.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 16***Resultados del filamento extruido, FE*

<b>Filamento</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	<b>Deformación [%]</b>
<b>FE-1</b>	3,07	55,49	2,77
<b>FE-2</b>	2,32	42,76	2,21
<b>FE-3</b>	2,27	47,01	2,32
<b>FE-4</b>	2,79	46,19	2,32
<b>FE-6</b>	2,78	44,12	2,17
<b>FE-7</b>	2,78	43,57	2,05
<b>FE-9</b>	2,53	52,51	2,66
<b>FE-10</b>	2,37	40,80	2,29
<b>PROMEDIO</b>	2,61	46,56	2,34

La desviación estándar (S) calculada del módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,28 - 5,04 y 0,24, respectivamente.

El resultado promedio del Módulo de Young obtenido en la Tabla 16, corresponde al obtenido de forma gráfica en la Figura 39.

El procedimiento descrito, se realizó para la totalidad de los cuerpos evaluados. A continuación, se presentan los resultados generales, descartando los datos obtenidos para FC-5, FC-13, FR-3 y FR-7.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 17***Resultados filamento de PLA puro obtenido por extrusión, FC*

<b>Filamento</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	<b>Deformación [%]</b>
<b>FC-6</b>	2,08	33,24	2,33
<b>FC-7</b>	1,75	34,19	3,19
<b>FC-8</b>	1,95	32,81	2,59
<b>FC-9</b>	2,20	33,98	2,76
<b>FC-10</b>	2,25	39,13	2,95
<b>FC-11</b>	1,16	35,76	3,36
<b>FC-12</b>	0,83	35,67	3,94
<b>FC-14</b>	1,82	30,79	8,03
<b>PROMEDIO</b>	1,75	34,45	3,64

La desviación estándar (S) calculada del módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,51 - 2,48 y 1,84 respectivamente.

**Tabla 18***Resultados del filamento de PLA Comercial con refuerzo*

<b>Filamento</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	<b>Deformación [%]</b>
<b>FR-1</b>	1,22	28,02	3,48
<b>FR-2</b>	1,23	29,54	17,78
<b>FR-4</b>	0,97	23,27	4,81
<b>FR-8</b>	1,10	27,19	18,51
<b>FR-9</b>	0,86	25,75	6,66
<b>FR-10</b>	1,46	42,98	9,42

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Filamento	Módulo de Young [GPa]	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación [%]
FR-11	0,73	27,72	9,72
FR-12	1,73	29,03	12,31
<b>PROMEDIO</b>	1,16	29,19	10,34

La desviación estándar (S) calculada del módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,32 - 5,91 y 5,59, respectivamente.

## 6.2. Probetas de PLA puro y con refuerzo

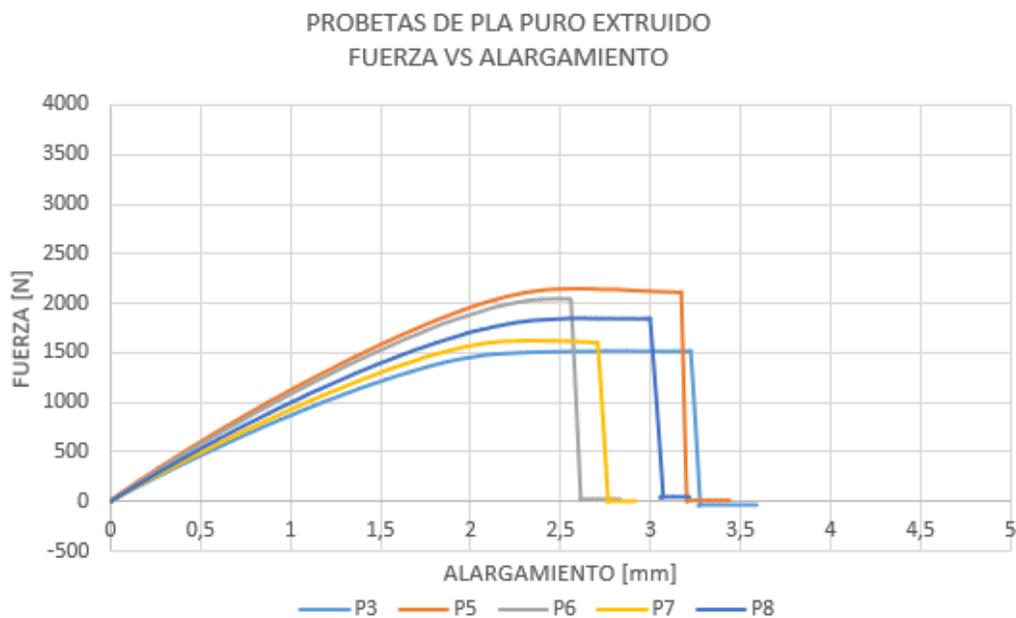
A partir de los datos (Fuerza [N] y Desplazamiento [mm]) entregados por la máquina de ensayos MTS Bionix Tabletop Test System, se calcularon los valores de esfuerzo [N/mm<sup>2</sup>] y deformación unitaria [mm/mm] con los que se realizó la gráfica correspondiente. De dicha gráfica, se determinaron los valores de Módulo de Young, esfuerzo máximo y deformación bajo la acción del esfuerzo máximo.

En la Figura 40 y 41 se presentan las gráficas Fuerza vs Alargamiento y Esfuerzo vs Deformación unitaria, respectivamente, para cada grupo de probetas evaluadas.

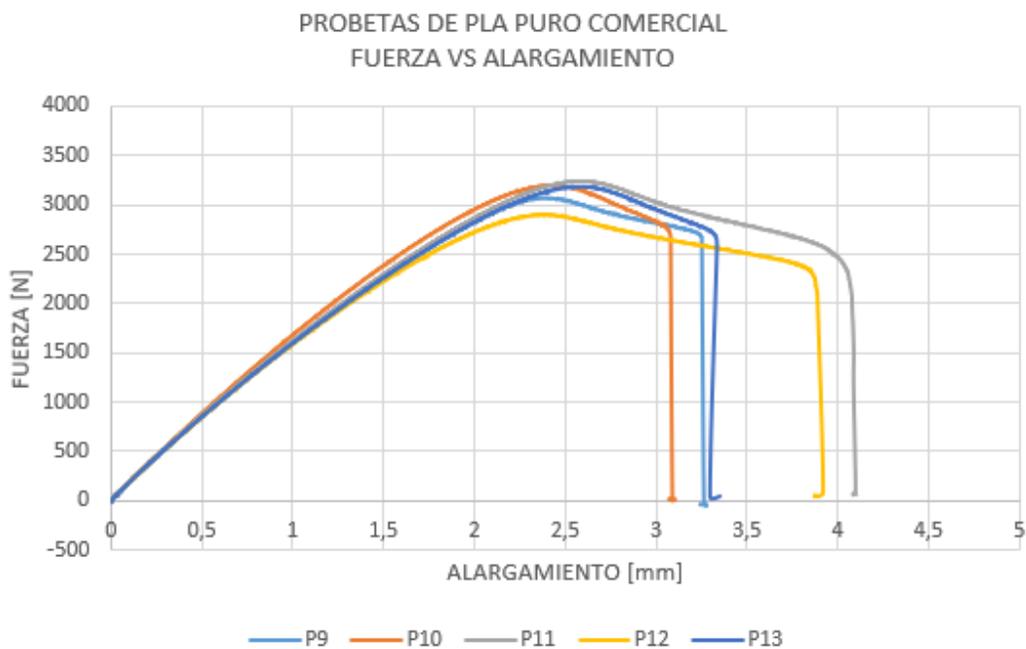
## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 40**

Fuerza vs Alargamiento de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con refuerzo de 13%, (d) PLA con refuerzo de 27%, (e) PLA con refuerzo de 40%

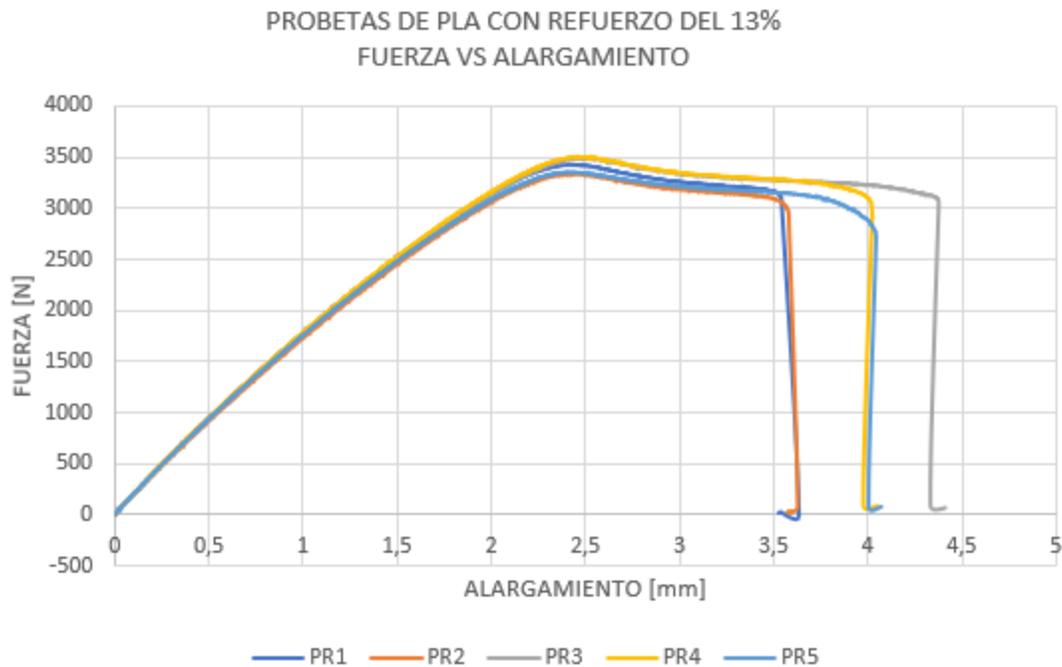


(a)

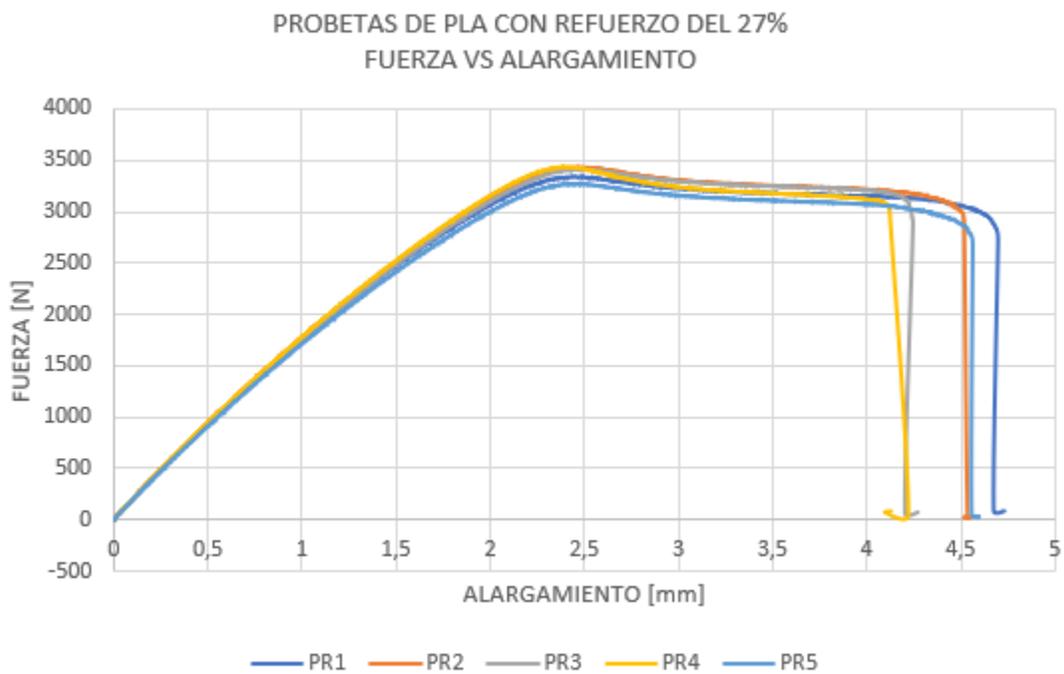


(b)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA



(c)



(d)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

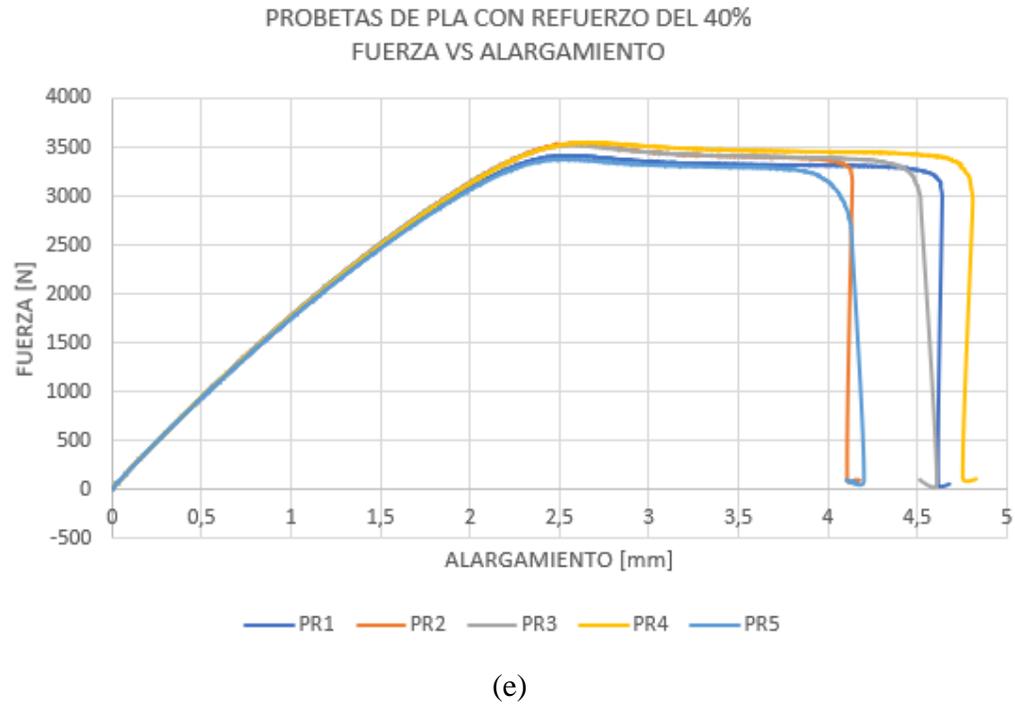
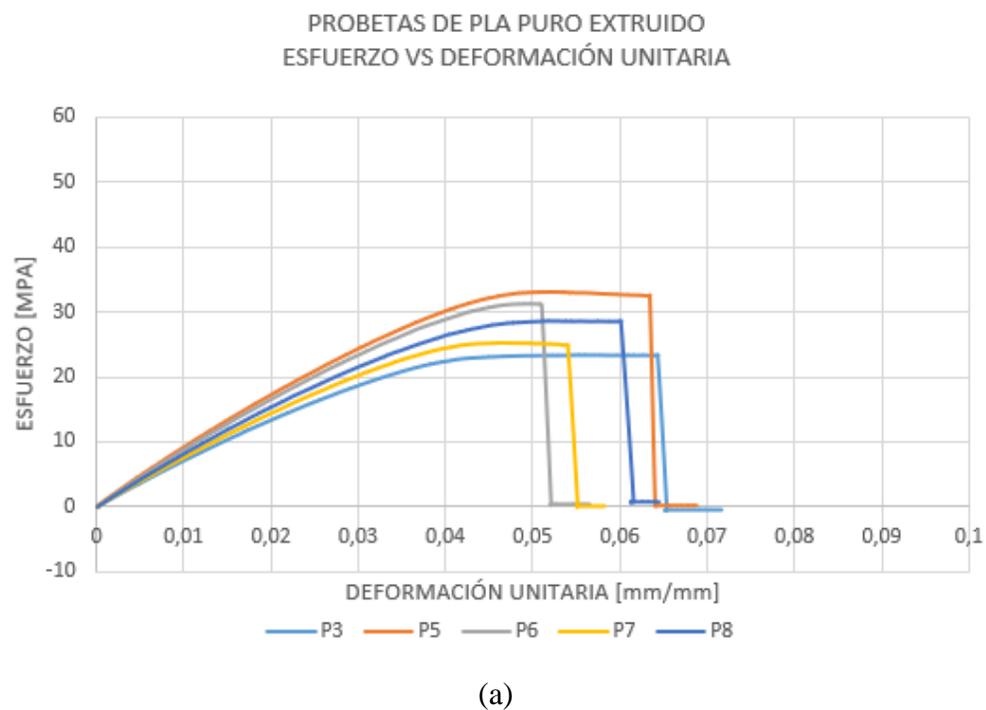
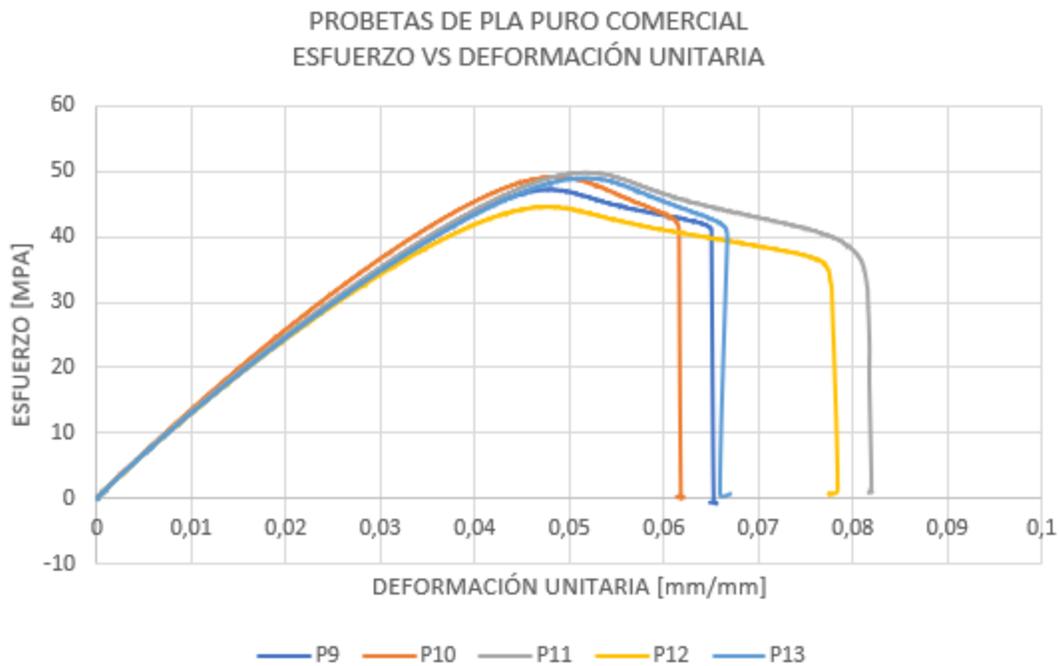


Figura 41

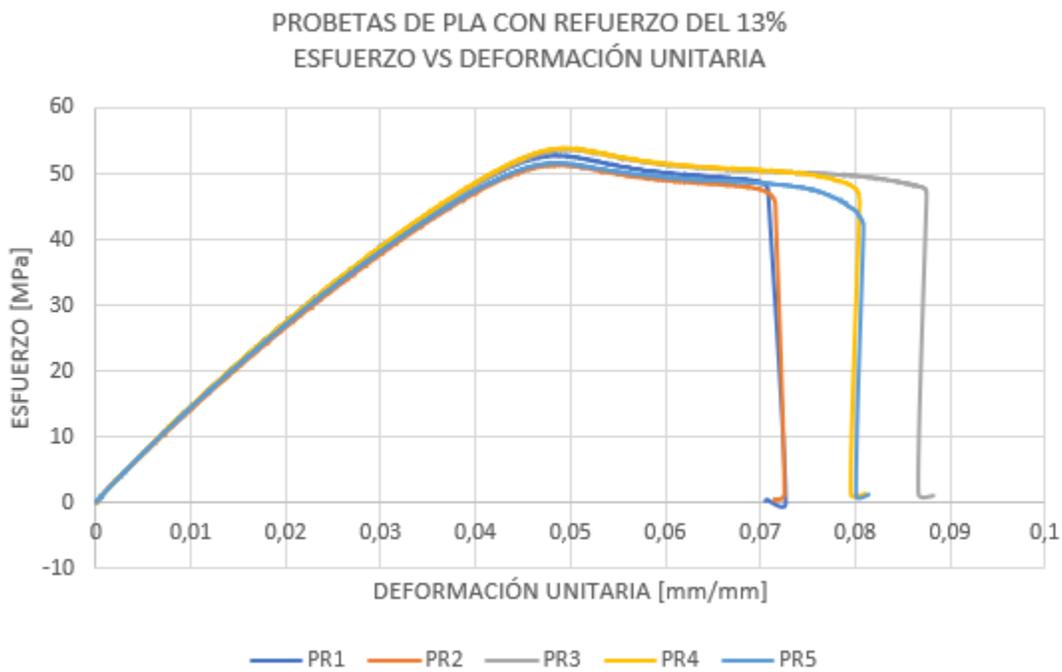
Esfuerzo vs Deformación unitaria de (a) PLA Extruido, (b) PLA Comercial (c) PLA con refuerzo de 13%, (d) PLA con refuerzo de 27%, (e) PLA con refuerzo de 40%



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

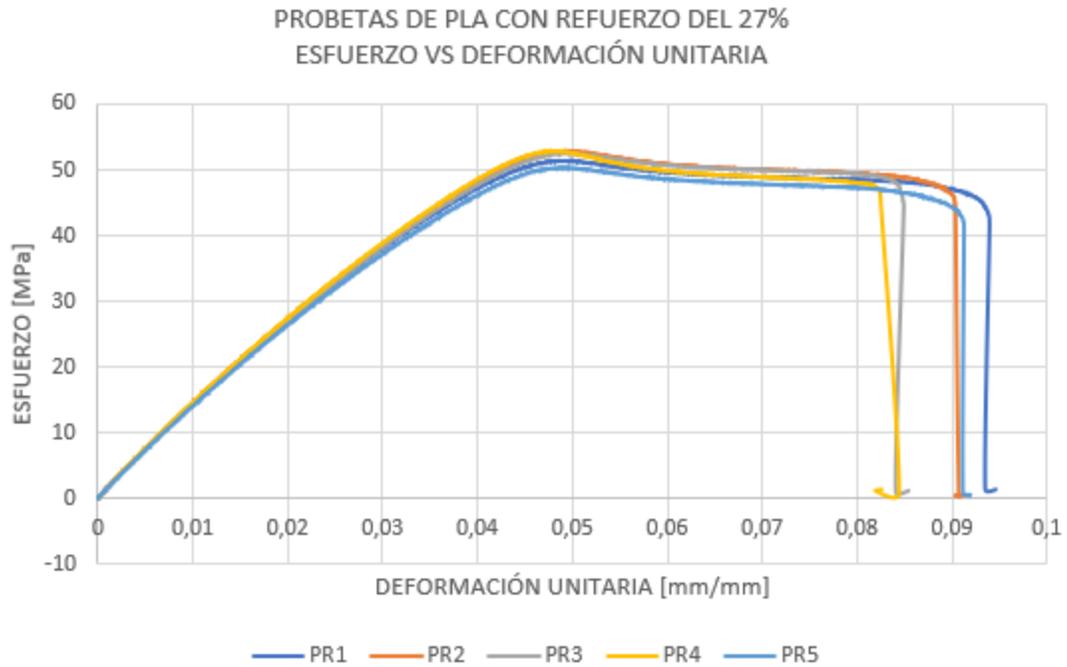


(b)

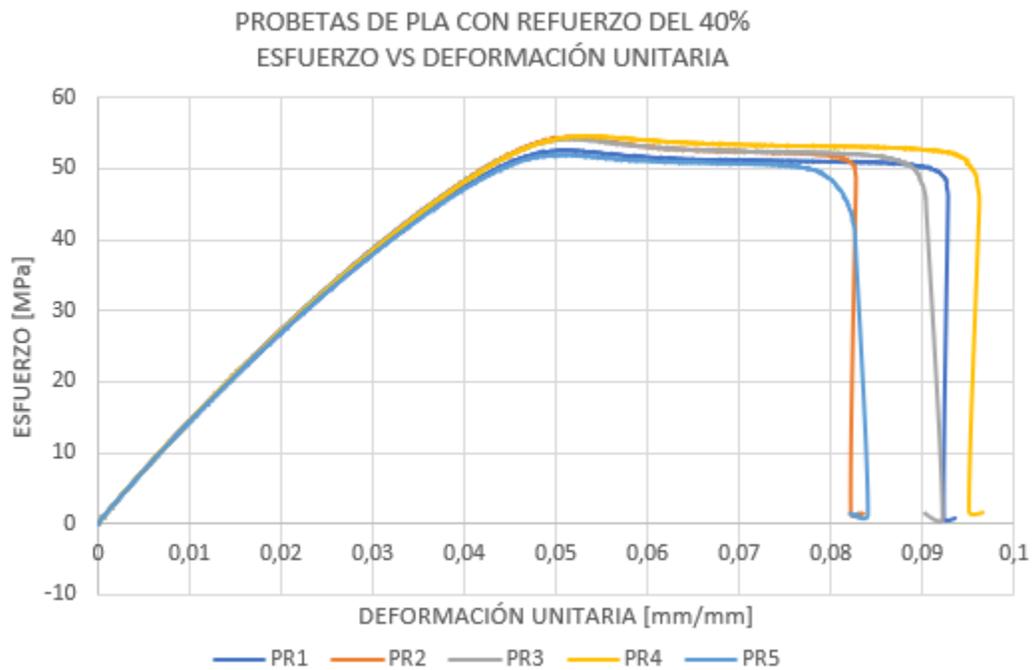


(c)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA



(d)



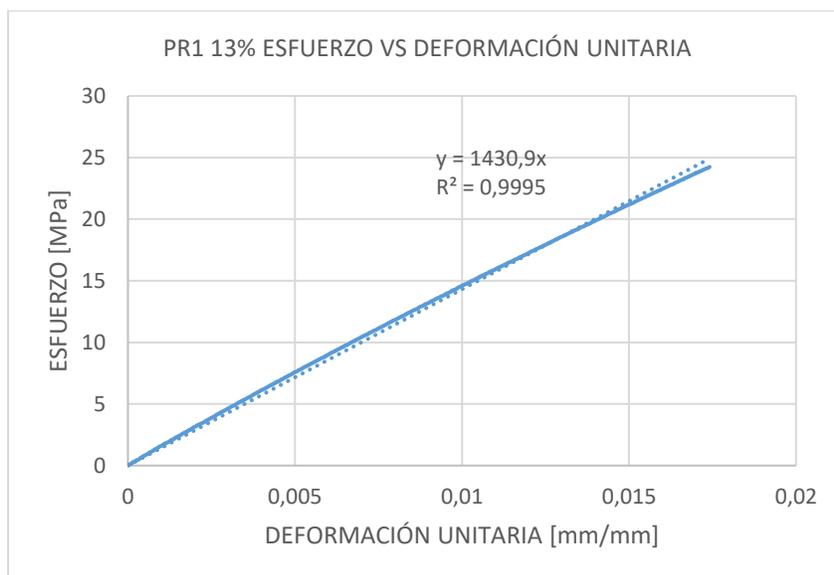
(e)

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Con el fin de obtener el Módulo de Young, y conociendo que este corresponde a la pendiente de la sección recta de la gráfica que representa la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, se realizó una regresión lineal sobre cada una de las gráficas, limitando los datos de trabajo para ajustar dicha regresión a la zona elástica del material. Una vez se logró esto, se obtuvo la ecuación de la recta graficada cuya pendiente corresponde al valor del Módulo de elasticidad o Módulo de Young. Junto a la ecuación de dicha recta se presenta la desviación estándar, para conocer la precisión que tiene la dispersión de los datos con respecto a la ecuación de la recta. En la Figura 42 se reseña el procedimiento para el cálculo del Módulo de Young de la probeta con refuerzo PR1 13%. En la Figura 43, se grafica la zona elástica de las 5 probetas con refuerzo de 13%, con el fin de determinar y validar los resultados promedio correspondientes.

### Figura 42

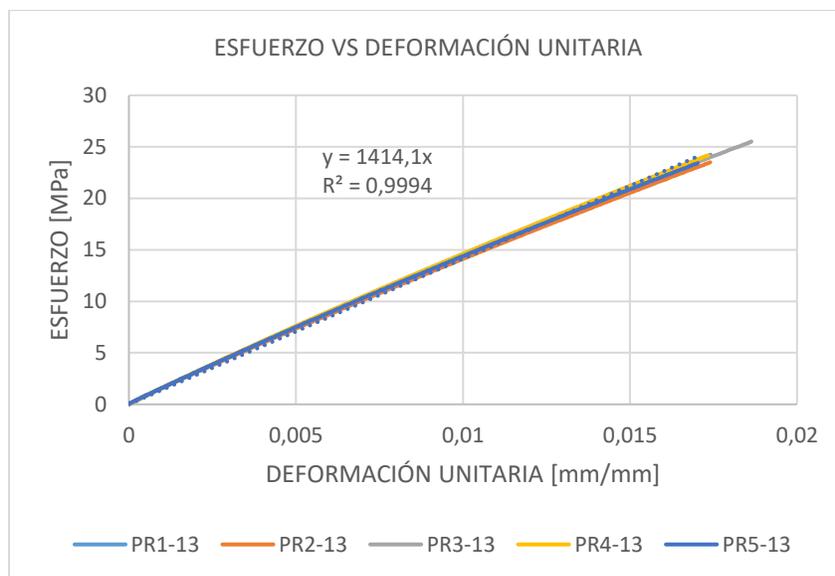
#### *Zona elástica de la probeta PR1 13%*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 43**

*Zona elástica promedio de las probeta PR 13%*



El valor del esfuerzo máximo y deformación se obtuvo a partir de los datos calculados y de su respectivo contraste con la gráfica Esfuerzo vs. Deformación unitaria. En la Tabla 19, se muestran los resultados generales para PR 13%.

**Tabla 19**

*Resultados PR 13%*

Probeta	Módulo de Young [GPa]	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación [%]
PR1 13%	1,43	52,71	4,84
PR2 13%	1,37	51,28	4,87
PR3 13%	1,41	53,65	4,96
PR4 13%	1,43	53,85	4,97
PR5 13%	1,41	51,58	4,82
<b>PROMEDIO</b>	1,41	52,61	4,892

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

La desviación estándar (S) calculada del Módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,019 – 1,170 y 0,069, respectivamente.

El resultado promedio del Módulo de Young obtenido en la Tabla 19, corresponde al obtenido de forma gráfica en la Figura 43.

El procedimiento descrito, se realizó para la totalidad de las probetas. A continuación, se presentan los resultados generales obtenidos.

**Tabla 20**

*Resultados PLA puro obtenido por extrusión*

<b>Probeta</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	<b>Deformación [%]</b>
<b>P3</b>	0,68	23,33	5,49
<b>P5</b>	0,88	32,99	5,21
<b>P6</b>	0,85	31,38	4,97
<b>P7</b>	0,75	25,11	4,67
<b>P8</b>	0,79	28,49	5,27
<b>PROMEDIO</b>	0,79	28,26	5,12

La desviación estándar (S) calculada del Módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,078 – 4,078 y 0,313, respectivamente.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 21***Resultados PLA comercial*

<b>Probeta</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	<b>Deformación [%]</b>
<b>P9</b>	1,26	47,19	4,80
<b>P10</b>	1,31	49,16	4,84
<b>P11</b>	1,28	49,83	5,15
<b>P12</b>	1,25	44,58	4,74
<b>P13</b>	1,26	48,97	5,17
<b>PROMEDIO</b>	1,27	47,95	4,94

La desviación estándar (S) calculada del Módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,025 – 2,121 y 0,204, respectivamente.

**Tabla 22***Resultados PLA con refuerzo del 27%*

<b>Probeta</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	<b>Deformación [%]</b>
<b>PR1 27%</b>	1,41	51,36	4,91
<b>PR2 27%</b>	1,43	52,80	4,96
<b>PR3 27%</b>	1,41	52,49	4,92
<b>PR4 27%</b>	1,43	52,82	4,81
<b>PR5 27%</b>	1,37	50,29	4,90
<b>PROMEDIO</b>	1,41	51,95	4,90

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

La desviación estándar (S) calculada del Módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,021 – 1,102 y 0,055, respectivamente.

**Tabla 23**

*Resultados PLA con refuerzo del 40%*

<b>Probeta</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	<b>Deformación [%]</b>
<b>PR1 40%</b>	1,40	52,53	5,10
<b>PR2 40%</b>	1,42	54,39	5,14
<b>PR3 40%</b>	1,43	54,12	5,14
<b>PR4 40%</b>	1,42	54,52	5,36
<b>PR5 40%</b>	1,41	51,91	5,05
<b>PROMEDIO</b>	1,42	53,49	5,16

La desviación estándar (S) calculada del Módulo de Young, Esfuerzo máximo y Deformación, fue de: 0,011 – 1,192 y 0,119, respectivamente.

## 7. Discusión

A continuación, se resumen los datos obtenidos de la sección 8, con los cuales se realizó el análisis del comportamiento mecánico a tracción de los materiales evaluados. Para compararlos se tabularon los valores de cada factor, seguido de un análisis de varianza (ANOVA) para determinar una posible variación entre los datos. Se finaliza con una gráfica de los valores promedios con su respectiva desviación estándar.

### 7.1. Módulo de Elasticidad o Módulo de Young en los filamentos de PLA

En la Tabla 24, se presentan los resultados del Módulo de Young (en GPa), correspondientes al ensayo de tracción realizado a los filamentos.

**Tabla 24**

*Módulo de elasticidad (GPa) de los filamentos*

Filamento extruido	Filamento comercial	Filamento con refuerzo
3,07	2,08	1,22
2,33	1,75	1,20
2,27	1,95	0,97
2,79	2,20	1,10
2,78	2,25	0,86
2,79	1,16	1,46
2,54	0,83	0,73
2,38	1,82	1,73

Siguiente el análisis ANOVA, para el cual se definieron dos hipótesis:

**Hipótesis nula:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, no cambian de forma significativa entre sí, para los valores correspondientes al Módulo de Young.

**Hipótesis alternativa:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, exhiben variaciones significativas entre sí, para los valores correspondientes al Módulo de Young.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 25***Análisis de varianza para el Módulo de Young de los filamentos*

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	8	20,96	2,62	0,08
Columna 2	8	14,03	1,75	0,26
Columna 3	8	9,30	1,16	0,10

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

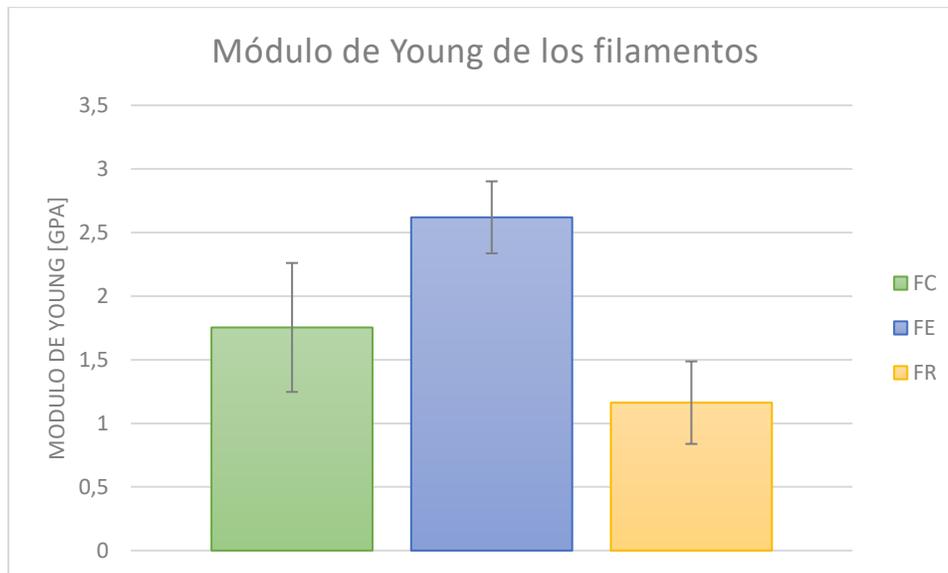
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	8,59	2	4,29	29,13	8,7739E-07	3,47
Dentro de los grupos	3,10	21	0,15			
Total	11,68	23				

Como el valor F es mayor que el valor crítico, se rechaza la Hipótesis nula y se acepta la Hipótesis alternativa, por ende, sí hay variación para el Módulo de Young, en por lo menos dos de los conjuntos de material evaluados.

A continuación, se grafican los valores promedios para el Módulo de Young, obtenidos en la sección 6. En dónde FC, corresponde al filamento comercial, FE, al filamento obtenido por extrusión y FR al filamento con refuerzo.

**Figura 44**

*Promedios del Módulo de Young de los filamentos*



De la Figura 44 se observa que el Módulo de Young es más alto para el Filamento obtenido por extrusión, y el más bajo para el Filamento con refuerzo. De acuerdo con la ley de Hooke, presentada en la sección 6, ecuación 4. Al ser mayor el Módulo de Young, serán menores las deformaciones y, por ende, el filamento extruido tiende a ser más rígido que los demás tipos de filamentos.

## 7.2. Esfuerzo Máximo en los filamentos de PLA

En la Tabla 26, se presentan los resultados del Esfuerzo máximo o Esfuerzo último (en MPa), correspondientes al ensayo de tracción realizado a los filamentos.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 26***Esfuerzo máximo (MPa) de los filamentos*

<b>Filamento extruido</b>	<b>Filamento comercial</b>	<b>Filamento con refuerzo</b>
55,49	33,24	28,02
42,77	34,19	29,54
47,02	32,80	23,27
46,19	33,98	27,20
44,13	39,13	25,75
43,57	35,76	42,98
52,51	35,67	27,72
40,81	30,79	29,03

Siguiente el análisis ANOVA, considerando que:

**Hipótesis nula:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, no cambian de forma significativa entre sí, para los valores correspondientes al Esfuerzo máximo.

**Hipótesis alternativa:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, exhiben variaciones significativas entre sí, para los valores correspondientes al Esfuerzo máximo.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 27***Análisis de varianza para el Esfuerzo máximo de los filamentos*

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	8	372,50	46,56	25,43
Columna 2	8	275,57	34,45	6,13
Columna 3	8	233,50	29,19	34,94

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

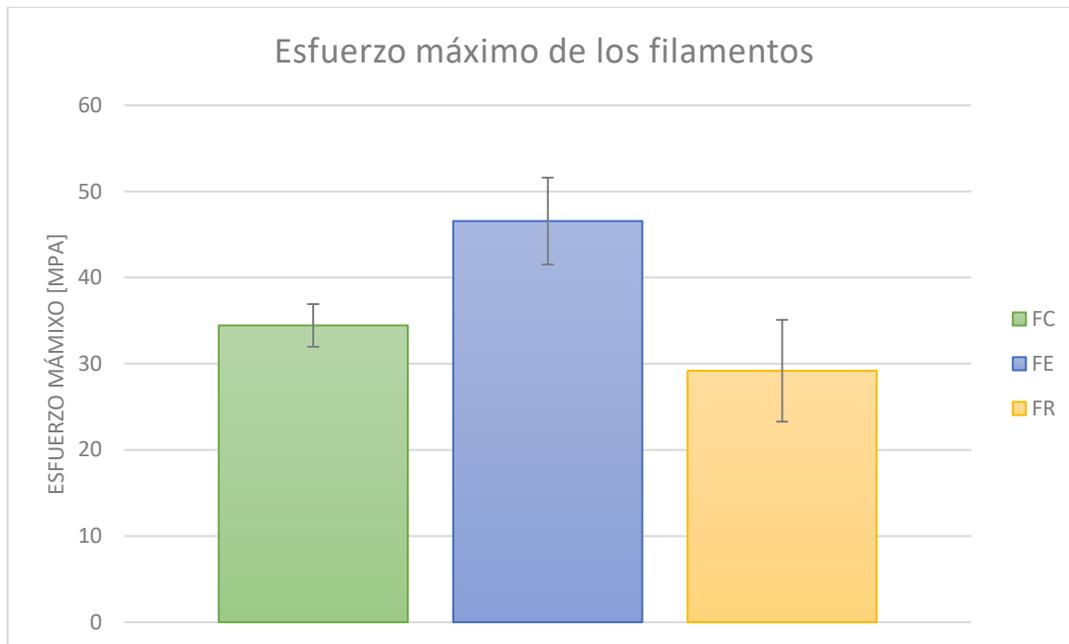
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1270,29	2	635,15	28,65	9,9667E-07	3,47
Dentro de los grupos	465,52	21	22,17			
Total	1735,81	23				

Como el valor F es mayor que el valor crítico, se rechaza la Hipótesis nula y se acepta la Hipótesis alternativa, por ende, sí hay variación para el Esfuerzo máximo, en por lo menos dos de los conjuntos de material evaluados.

A continuación, se grafican los valores promedios para el Esfuerzo máximo, obtenidos en la sección 6.

**Figura 45**

*Promedios del Esfuerzo máximo de los filamentos*



De la Figura 45, el Filamento que soporta mayor valor de esfuerzo, es el obtenido por extrusión y se mantiene una proporcionalidad en los demás filamentos, siendo menor el valor de esfuerzo soportado en el Filamento con refuerzo.

### 7.3. Deformación en los filamentos de PLA

En la Tabla 28, se presentan los resultados de la Deformación (en %), correspondientes al ensayo de tracción realizado a los filamentos.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 28***Deformación (%) de los filamentos*

<b>Filamento extruido</b>	<b>Filamento comercial</b>	<b>Filamento con refuerzo</b>
2,77	2,33	3,48
2,21	3,19	17,78
2,32	2,59	4,81
2,32	2,76	18,51
2,17	2,95	6,66
2,05	3,36	9,42
2,66	3,94	9,72
2,29	8,03	12,31

Siguiente el análisis ANOVA, considerando que:

**Hipótesis nula:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, no cambian de forma significativa entre sí, para los valores correspondientes a la Deformación.

**Hipótesis alternativa:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, exhiben variaciones significativas entre sí, para los valores correspondientes a la Deformación.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 29***Análisis de varianza para la deformación de los filamentos*

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	8	18,79	2,35	0,06
Columna 2	8	29,15	3,64	3,39
Columna 3	8	82,69	10,34	31,20

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	294,04	2	147,02	12,73	0,00023928	3,47
Dentro de los grupos	242,53	21	11,55			
Total	536,57	23				

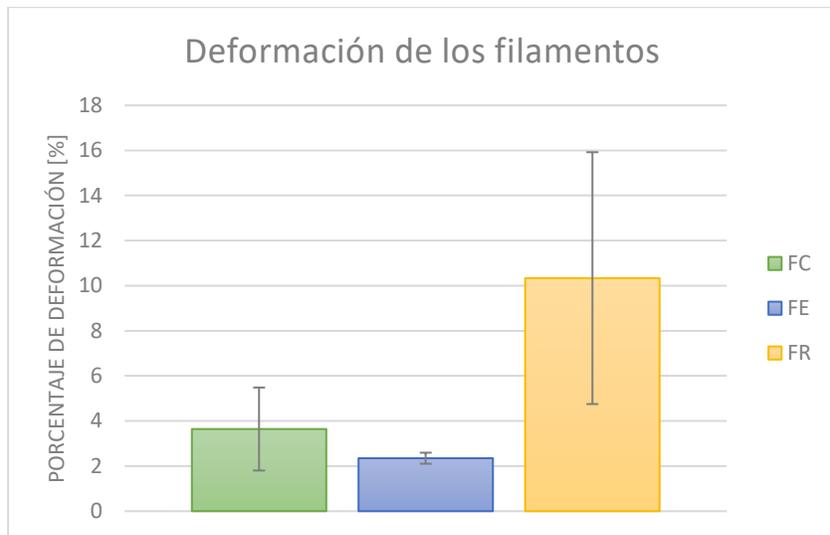
Como el valor F es mayor que el valor crítico, se rechaza la Hipótesis nula y se acepta la Hipótesis alternativa, por ende, sí hay variación para la deformación, en por lo menos dos de los conjuntos de material evaluados.

A continuación, se grafican los valores promedios para la Deformación, obtenidos en la sección 8.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 46**

*Promedios de la deformación de los filamentos*

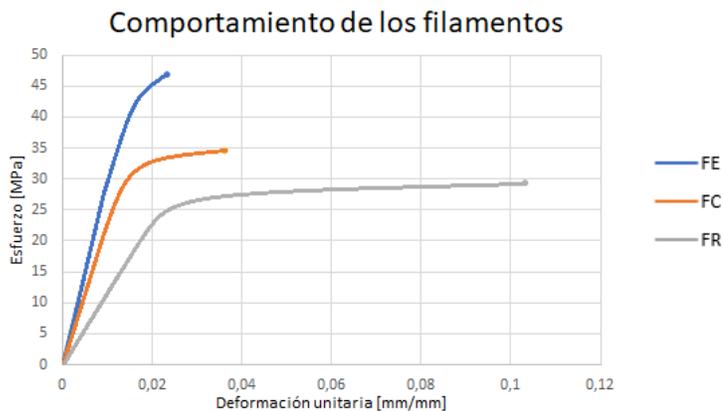


De la Figura 46, el Filamento con refuerzo es el que presenta mayores valores de deformación, mientras que el Filamento extruido exhibe los menores valores.

Finalmente, se graficó el comportamiento del material como filamento a partir de los valores promedio.

**Figura 47**

*Comportamiento general de los filamentos*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

De la Figura 47, se tiene que el Filamento con refuerzo posee la menor capacidad de soportar valores altos de esfuerzo, en relación con los demás filamentos, sin embargo, presentó el mayor valor de deformación antes de llegar a su esfuerzo máximo. Se considera que el comportamiento descrito fue influenciado por el tipo de fabricación (impresión 3D) utilizado para obtener el filamento con refuerzo, el cual puede variar de acuerdo con la configuración de los parámetros de impresión.

### 7.4. Módulo de Elasticidad o Módulo de Young en las probetas de PLA

En la Tabla 30, se presentan los resultados del Módulo de Young (en GPa), correspondientes al ensayo de tracción realizado a las probetas. En dónde la casilla etiquetada como PLA EXTRUIDO, corresponde a las probetas de PLA obtenido por extrusión. La casilla de 0% corresponde al PLA comercial para impresión 3D, y las casillas de 13%, 27% y 40% corresponden a las probetas fabricadas con el porcentaje de material de refuerzo indicado.

**Tabla 30**

*Módulo de Young (GPa) de las probetas*

<b>PLA Extruido</b>	<b>0%</b>	<b>13%</b>	<b>27%</b>	<b>40%</b>
0,68	1,26	1,43	1,41	1,40
0,88	1,31	1,39	1,43	1,42
0,85	1,28	1,41	1,41	1,43
0,75	1,25	1,43	1,43	1,42
0,79	1,26	1,41	1,37	1,41

Se realiza el análisis ANOVA correspondiente, considerando que:

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Hipótesis nula:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, no cambian de forma significativa entre sí, para los valores correspondientes al Módulo de Young.

**Hipótesis alternativa:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, exhiben variaciones significativas entre sí, para los valores correspondientes al Módulo de Young.

**Tabla 31**

*Análisis de varianza para el Módulo de Young de las probetas*

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	5	3,95	0,79	0,0061
Columna 2	5	6,36	1,27	0,0006
Columna 3	5	7,07	1,41	0,0004
Columna 4	5	7,06	1,41	0,0005
Columna 5	5	7,08	1,42	0,0001

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1,47	4	0,370	238,08	1,4634E-16	2,87
Dentro de los grupos	0,03	20	0,002			
Total	1,50	24				

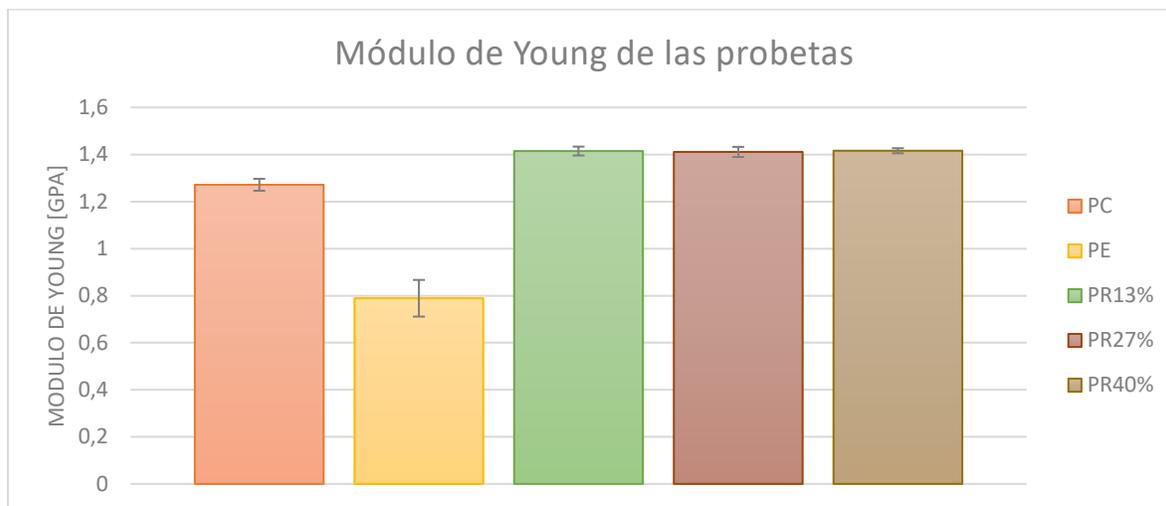
Como el valor F es mayor que el valor crítico, se rechaza la Hipótesis nula y se acepta la Hipótesis alternativa, por ende, sí hay variación para el Módulo de Young, en por lo menos dos de los conjuntos de material evaluados.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

A continuación, se grafican los valores promedios para el Módulo de Young, obtenidos en la sección 6.

**Figura 48**

*Promedios del Módulo de Young de las probetas*



De la Figura 48, se observa un valor promedio del Módulo de Young similar para las probetas con refuerzo y mayor que el obtenido para las probetas de PLA comercial y PLA obtenido por extrusión.

### 7.5. Esfuerzo Máximo en las probetas de PLA

En la Tabla 32, se presentan los resultados del Esfuerzo máximo o Esfuerzo último (en MPa), correspondientes al ensayo de tracción realizado a las probetas.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 32***Esfuerzo máximo (MPa) de las probetas*

<b>PLA Extruido</b>	<b>0%</b>	<b>13%</b>	<b>27%</b>	<b>40%</b>
23,33	47,20	52,71	51,36	52,53
32,99	49,16	51,28	52,80	54,39
31,38	49,83	53,65	52,49	54,12
25,11	44,58	53,85	52,82	54,52
28,49	48,97	51,58	50,30	51,91

Se realiza el análisis ANOVA correspondiente, considerando que:

**Hipótesis nula:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, no cambian de forma significativa entre sí, para los valores correspondientes al Esfuerzo máximo.

**Hipótesis alternativa:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, exhiben variaciones significativas entre sí, para los valores correspondientes al Esfuerzo máximo.

**Tabla 33***Análisis de varianza para el Esfuerzo máximo de las probetas*

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	5	141,30	28,26	16,63
Columna 2	5	239,74	47,95	4,50
Columna 3	5	263,07	52,61	1,36
Columna 4	5	259,77	51,95	1,22

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Columna 5	5	267,46	53,49	1,42
-----------	---	--------	-------	------

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

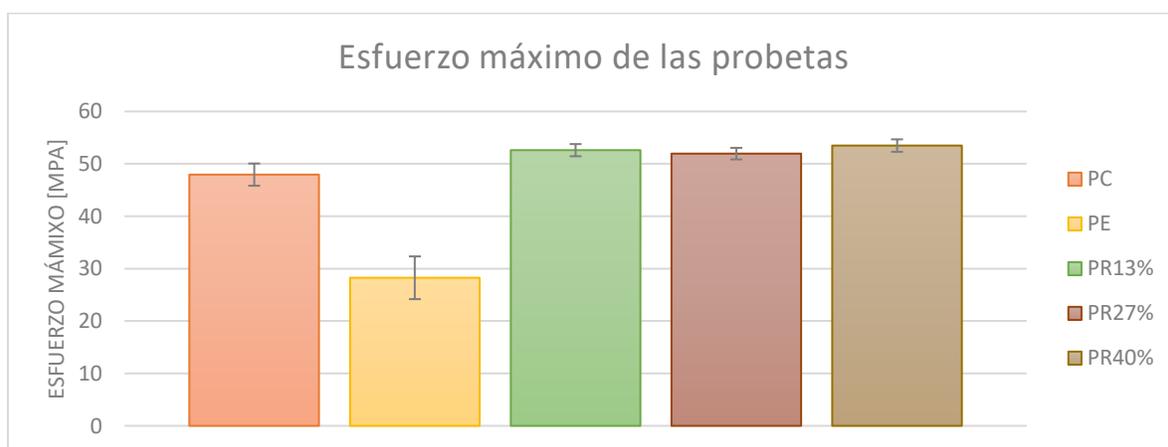
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2250,82	4	562,70	111,99	2,1506E-13	2,87
Dentro de los grupos	100,50	20	5,02			
Total	2351,31	24				

Como el valor F es mayor que el valor crítico, se rechaza la Hipótesis nula y se acepta la Hipótesis alternativa, por ende, sí hay variación para el Esfuerzo máximo, en por lo menos dos de los conjuntos de material evaluados.

A continuación, se grafican los valores promedios para el Esfuerzo máximo, obtenidos en la sección 6.

**Figura 49**

*Promedios del Esfuerzo máximo de las probetas*



La Figura 49, presenta valores similares para las probetas de PLA con refuerzo, y superiores de forma significativa, comparadas con las probetas fabricadas con PLA extruido.

### 7.6. Deformación en las probetas de PLA

En la Tabla 34, se presentan los resultados de la Deformación (%), correspondientes al ensayo de tracción realizado a las probetas.

**Tabla 34**

*Deformación (%) de las probetas*

<b>PLA Extruido</b>	<b>0%</b>	<b>13%</b>	<b>27%</b>	<b>40%</b>
5,49	4,80	4,84	4,91	5,1
5,21	4,84	4,87	4,96	5,14
4,97	5,15	4,96	4,92	5,14
4,67	4,74	4,97	4,81	5,36
5,27	5,17	4,82	4,9	5,05

Se realiza el análisis ANOVA correspondiente, considerando que:

**HIPÓTESIS NULA:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, no cambian de forma significativa entre sí, para los valores correspondientes a la Deformación.

**HIPÓTESIS ALTERNATIVA:** Las probetas de PLA puro obtenido por extrusión, PLA puro comercial, y PLA con refuerzo, exhiben variaciones significativas entre sí, para los valores correspondientes a la Deformación.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Tabla 35***Análisis de varianza para la deformación de las probetas*

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	5	25,61	5,122	0,098
Columna 2	5	24,70	4,94	0,042
Columna 3	5	24,46	4,892	0,005
Columna 4	5	24,50	4,9	0,003
Columna 5	5	25,79	5,158	0,014

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,33	4	0,08	2,52	0,074	2,87
Dentro de los grupos	0,65	20	0,03			
Total	0,97	24				

Como el valor F es mayor que el valor crítico, se acepta la Hipótesis nula, por ende, no hay variación para la Deformación, entre los conjuntos de material evaluados.

A continuación, se grafican los valores promedios para la Deformación, obtenidos en la sección 6.

PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

**Figura 50**

*Promedios de la Deformación de las probetas*

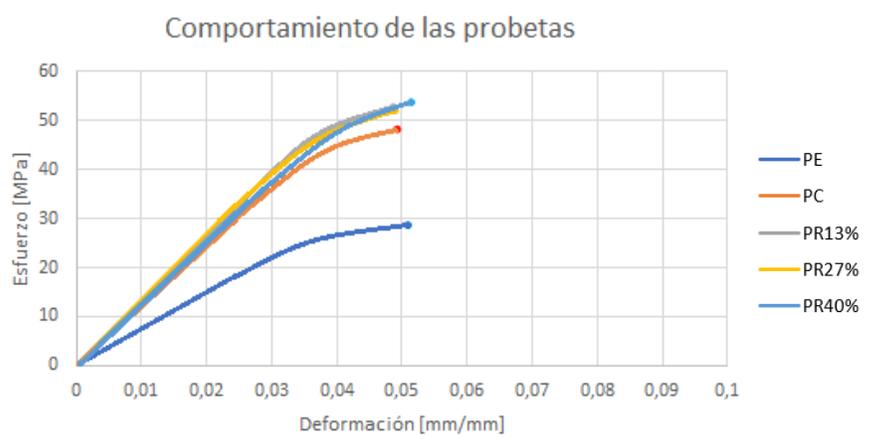


De la Figura 50, no hay variación significativa entre los valores de deformación, para los grupos de probetas ensayadas.

Finalmente, se graficó el comportamiento del material como probeta a partir de los valores promedio.

**Figura 51**

*Comportamiento general de las probetas*



## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

De la Figura 51, se observa de forma clara, que las probetas fabricadas con PLA y material de refuerzo tienen un comportamiento similar, y mejor que los demás materiales ensayados. Como se mencionó en la descripción de la Figura 50, los tipos de materiales tienen un valor similar de deformación al llegar al esfuerzo máximo soportado.

### 8. Conclusiones

El filamento de PLA puro obtenido por medio de extrusión presentó un mejor comportamiento en algunas de las propiedades mecánicas con respecto a los filamentos de PLA comercial y PLA con refuerzo. Dado que el módulo de Young y el esfuerzo máximo aumentaron en un 33% y 26% respectivamente comparado con el filamento de PLA comercial. Caso contrario al valor de la deformación del material en el punto de esfuerzo máximo, que fue el menor de los tres materiales evaluados. Lo anterior, se atribuye en gran parte a la no uniformidad del filamento extruido que, ayudó a aumentar los valores obtenidos para el módulo de Young y el esfuerzo máximo, sin embargo, debido a la presencia de secciones delgadas, el material presentó una rotura sin que la deformación llegara a valores superiores a los obtenidos.

El filamento de PLA con refuerzo de fibra continua de algodón presentó los menores valores para Módulo de Young y Esfuerzo máximo, 33,7% y 15% menos comparados con el filamento de PLA comercial. El valor de deformación para este tipo de filamento aumentó, de forma considerable, resultando útil para situaciones en que se produzca sobrecarga y sea necesario identificar la deformación antes de que ocurra la falla. El comportamiento de este material se atribuye al método de fabricación que debido a los recursos limitados con los que se trabajó no fue el óptimo para garantizar la uniformidad y la correcta adherencia de los dos materiales empleados.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

Las probetas de PLA con refuerzo de fibras de algodón no presentaron variaciones significativas de las propiedades entre sí, independiente de la cantidad de material de refuerzo agregado. Sin embargo, se observó una mejora del módulo de Young del 10,1% y del esfuerzo máximo del 9%, respecto a las probetas fabricadas con PLA comercial. Para los valores de deformación no se presentó una variación significativa entre los grupos de probetas ensayados.

Las probetas fabricadas con PLA obtenido por medio de extrusión arrojaron los menores valores para el Módulo de Young y Esfuerzo máximo, 37,9% y 41,1% menos respectivamente, comparados con las probetas de PLA comercial. Comportamiento atribuido inicialmente al proceso de fabricación del filamento, en el que el material de PLA fue expuesto a altas temperaturas durante periodos de tiempo significativos, lo que influye de forma directa en la disminución de las propiedades del filamento obtenido. También, es relevante la irregularidad del diámetro del filamento que impide la deposición uniforme de material durante el proceso de impresión 3D, dejando mayores irregularidades entre las capas de las probetas fabricadas. Y finalmente, al origen del material empleado, puesto que el ácido láctico (y por ende el ácido poliláctico) puede ser obtenido de sacarosa de caña de azúcar, remolacha, lactosa de origen en el lactosuero, entre otras, de las cuales dependerá el comportamiento mecánico final del material.

Por lo anterior, se concluye que, la aplicación del material compuesto de PLA y fibras de algodón se limita a situaciones que requieran una resistencia adicional del material no superior al 9%, sin que esto implique un aumento considerable de la masa inicial.

## **9. Recomendaciones**

Debido a la facilidad del PLA para absorber la humedad, se recomienda tener especial cuidado en su manipulación (empacar al vacío, usar zonas secas para su almacenamiento) de forma que se garantice la realización del trabajo con el material en condiciones adecuadas.

Al recurrir al método de extrusión para obtener el filamento, se recomienda que el tamaño del equipo sea el conveniente para una fácil y rápida circulación de la materia prima, puesto que una extrusora de grandes dimensiones requiere una mayor cantidad de material y posiblemente éste se verá expuesto a altas temperaturas durante periodos de tiempo prolongados mientras circula de la tolva a la boquilla de salida.

### Referencias Bibliográficas

- Askeland, D., & Wright, W. (Séptima Ed.). (2017). *Ciencia de los materiales*. Cengage Learning.
- Awal, A. Rana, M. & Sain, M. (2015). *Thermorheological and mechanical properties of cellulose reinforced PLA bio-composites*. *Mechanics of Materials*, 80, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.09.009>
- Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública (MASP) de la Facultad de Derecho de la Universidad de los Andes y Greenpeace Colombia. (2019). *Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente*. [https://planetaconsentido.org/wp-content/uploads/2020/10/gp\\_informe\\_plasticos\\_colombia\\_02.pdf](https://planetaconsentido.org/wp-content/uploads/2020/10/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf)
- Estrada, C. (2021, septiembre). *Colombia recicla material plástico por un aproximado de 300.000 a 350.000 toneladas por año*. La República. <https://www.larepublica.co/>
- Farah, Anderson, D. G. & Langer, R. (2016). *Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review*. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367–392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
- Herryman Munilla, M. y Blanco Carracedo, G. (2005). *Ácido láctico y poliláctico: situación actual y tendencias*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XXXIX, 49-59.
- López, C. F. J. y Barrera, M. S. D. (2019). *Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA) reciclado y modificado con lignina* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Murariu, & Dubois, P. (2016). *PLA composites: From production to properties*. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 17–46. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003>.
- Narlioglu, N., Salan, T., & Alma, M. H. (2021). *Properties of 3D-printed wood sawdust-reinforced PLA composites*. *BioResources* 16(3), 5467-5480. <http://doi.org/10.15376/biores.16.3.5467-5480>
- Pacheco, C. G. I. (2019). *Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Rajeshkumar, G. Arvinth Seshadri, S. Devnani, G.L. Sanjay, M.R. Suchart Siengchin, J. Prakash Maran. Naif Abdullah Al-Dhabi. Ponmurugan Karuppiyah. Valan Arasu Mariadhas.

## PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS DE PLA

- Sivarajasekar, N. Ronaldo Anuf , A. (2021). *Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127483>
- Rodríguez, S. J. y Restrepo, A. D. G. (2015). *Elaboración y caracterización de componentes plásticos porosos, mediante impresión 3D para aplicaciones de regeneración ósea* (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C., Colombia.
- Vukasovic, H. T. V. (2018). *Caracterización de probetas de termoplástico fabricadas mediante impresión 3D* (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile.