

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Mecánico

PROYECTO TÉCNICO:

**“ANÁLISIS DE TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D MEDIANTE
DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO DE PLA, ABS Y PLA/MLO”**

Autor:

Gustavo Ismael Pacheco Carpio

Tutor:

Ing. Christian Mauricio Cobos Maldonado, M. Sc.

Cuenca – Ecuador

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Gustavo Ismael Pacheco Carpio, con documento de identificación N° 0105254502 manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D MEDIANTE DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO DE PLA, ABS Y PLA/MLO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, marzo del 2019



Gustavo Ismael Pacheco Carpio
C.I.: 0105254502

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D MEDIANTE DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO DE PLA, ABS Y PLA/MLO”, realizado por Gustavo Ismael Pacheco Carpio, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, marzo del 2019



Ing. Christian Mauricio Cobos Maldonado, M. Sc.

C.I.: 0104015938

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Gustavo Ismael Pacheco Carpio, con número de cédula 0105254502, autor del trabajo de titulación “ANÁLISIS DE TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D MEDIANTE DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO DE PLA, ABS Y PLA/MLO”, certifico que el total contenido del *proyecto técnico* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, marzo del 2019



Gustavo Ismael Pacheco Carpio
C.I.: 0105254502

DEDICATORIA

Dedico de manera especial este trabajo a mis abuelos Rafael e Inés (+) quienes fueron mi gran ejemplo y estuvieron día a día en todos mis procesos de formación personal, y académica.

A mi madre Cecilia quien dejó como su mejor herencia su ejemplo de persistencia, ética y responsabilidad, formando un conjunto de grandes enseñanzas que me ayudaron a ser una mejor persona y culminar mis metas de la mejor manera.

A todos mis hermanos quienes fueron la razón más fuerte para seguir adelante y no declinarse en el camino, especialmente a mi hermana Michelle (+).

A mis tíos y primos les quiero agradecer por la confianza depositada y su apoyo en los momentos de mayor necesidad.

Finalmente quiero agradecer a todos mis amigos forjados durante todos estos años siendo un apoyo muy importante en los momentos más difíciles de todo el proceso de titulación.

Gustavo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a toda la comunidad salesiana de la ciudad de Cuenca de la cual soy parte desde mi infancia inicialmente dentro de la escuela “Padre Carlos Crespi”, pasando posteriormente a la “Unidad Educativa Técnico Salesiano” y finalizando en la “Universidad Politécnica Salesiana”, siendo en todo el proceso un salesiano de corazón.

Agradezco al personal docente de la carrera de Ingeniería Mecánica por todos los conocimientos recibidos a lo largo de nuestra formación académica, personal y social.

Agradezco al Grupo ASU Mecánica por brindarme la oportunidad de guiarlos gran parte de mi carrera universitaria recibiendo enseñanzas de liderazgo y confianza, formando más que un equipo de trabajo una familia al puro estilo salesiano.

Finalmente agradezco al Ing. Christian Cobos, por el acompañamiento dado durante todo el transcurso de este proyecto y los conocimientos impartidos dentro y fuera de las aulas de clases.

Gustavo.

RESUMEN

El proyecto consiste en analizar propiedades mecánicas de tres materiales diferentes utilizados para impresión 3D. El proceso comienza con el diseño tridimensional de una probeta estándar realizado en software de diseño CAD, de manera que se pueda transferir a un post procesador de objetos que posteriormente genera un código G donde se encuentre toda la información para crear el objeto en impresión 3D. Por otro lado, se tiene que realizar un proceso de mezcla y obtención del material a imprimir, el mismo que debe ser lo más homogéneo posible para evitar problemas en el momento de la impresión. Dentro del proceso de impresión se debe tomar en cuenta parámetros como la velocidad de impresión, temperatura del material, patrón de relleno, densidad de relleno, entre otros. El número total de probetas es de 42 distribuidas en 14 probetas de PLA, 14 probetas de ABS y 14 probetas de PLA/MLO 5phr, con densidades del 40 y 80%. Se realizó el ensayo de tracción, donde se obtuvo una base de datos que permitan el análisis de la variación existente entre uno u otro parámetro. Finalmente se mejoró la elongación en las probetas que tienen plastificante natural con la densidad del 80%, en las probetas con densidad del 40% no afecta la adición del MLO. La densidad de relleno genera un alto índice de varianza en el esfuerzo máximo.

Palabras Clave: Impresión por FDM, Programa Cura, PLA, ABS, MLO, ensayo de tracción, esfuerzo máximo, densidad de relleno.

ABSTRACT

The project consists of analyzing mechanical properties of three different materials used for 3D printing. The process begins with the three-dimensional design of a standard specimen made in CAD design software, so that it can be transferred to a post-processor of objects that later generates a G code where all the information to create the object in 3D printing is found. On the other hand, it is necessary to carry out a process of mixing and obtaining the material to be printed, which must be as homogeneous as possible to avoid problems at the time of printing. Within the printing process should take into account parameters such as print speed, material temperature, fill pattern, fill density, among others. The total number of specimens is 42 distributed in 14 PLA specimens, 14 ABS specimens and 14 PLA / MLO 5phr specimens, with densities of 40 and 80%. The tensile test was carried out, where a database was obtained that allows the analysis of the existing variation between one or the other parameter. Finally, the elongation was improved in the specimens that have natural plasticizer with the density of 80%, in the specimens with density of 40% does not affect the addition of the MLO. Fill density generates a high index of variance at maximum stress.

Keywords: Printing by FDM, Cure software, PLA, ABS, MLO, tensile test, maximum stress, filling density.

ÍNDICE

Cesión de derechos de autor	II
Certificación	III
Declaratoria de responsabilidad.....	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos.....	VI
Resumen	VII
Abstract.....	VIII
Índice.....	IX
Índice de figuras	XII
Índice de tablas	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PROBLEMA.....	2
2.1 Antecedentes	3
2.2 Importancia y alcances	4
2.3 Delimitación.....	5
3. OBJETIVOS.....	5
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos.....	5
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
4.1 Proyecto RepRap.....	6
4.2 Tecnología FDM.....	7
4.3 Proceso de impresión	8
4.4 Componentes de la impresora 3D con tecnología FDM.....	9
4.5 Parámetros involucrados en el proceso de impresión	11
4.5.1 Espesor de capa	11
4.5.2 Densidad de relleno.....	11
4.5.3 Patrón de relleno.....	12

4.6	Materiales utilizados en la impresión 3D por FDM.....	13
4.6.1	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	13
4.6.1.1	Propiedades del ABS.....	14
4.6.2	PLA	14
4.6.2.1	Propiedades del PLA.....	15
4.6.3	Plastificante MLO	15
4.7	Ensayo de tracción.....	16
4.7.1	Diagrama esfuerzo deformación.....	17
4.7.2	Resistencia a la fluencia.....	19
4.7.2.1	Fluencia continua.....	19
4.7.2.2	Fluencia discontinua.....	20
4.7.3	Resistencia a la tracción	21
4.7.4	Alargamiento	22
4.8	Conclusiones	23
5.	MARCO METODOLÓGICO.....	23
5.1	Diseño de la investigación	25
5.1.1	Etapa A.....	25
5.1.2	Etapa B	28
FASE 1:	Secado de material.....	28
FASE 2:	Obtención del filamento	28
5.1.3	Etapa C	29
FASE 4:	Pruebas de impresión	29
FASE 5:	Impresión de probetas.....	29
FASE 6:	Ensayo de tracción.....	29
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	30
6.1	Análisis estadístico ANOVA.....	34
6.1.1	Análisis estadístico ANOVA para el esfuerzo máximo.	35

6.1.2	Análisis estadístico ANOVA para la elongación.....	40
6.2	Análisis de las curvas esfuerzo deformación	45
	Conclusiones	47
	Recomendaciones.....	48
	Trabajos futuros	49
	Referencias bibliográficas.....	50
	Anexos	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primera impresora 3D construida en 2007 denominada Darwin. Adaptado de: [18].	6
Figura 2. Impresora 3D de modelado por deposición fundida (FDM). Adaptado de: [24].	8
Figura 3. Proceso de impresión. Fuente: [27].	9
Figura 4. Impresora BCN3D+. Adaptado de: [28].	9
Figura 5. Impresora BCN3D+ vista lateral y frontal. Adaptado de: [28].	10
Figura 6. Cabezal de impresora BCN3D+. Adaptado de: [28].	10
Figura 7. Influencia del espesor de capa en el acabado superficial. Adaptado de: [29].	11
Figura 8. Representación del porcentaje de relleno que puede tener una pieza impresa. Fuente: Autor.	12
Figura 9. Patrón de relleno: a) Sin relleno, b) Honeycomb, c) Octaedro d) Hilbert e) Archi f) Line g) Grid h) Rectilíneo. Adaptado de: [32].	12
Figura 10. Estructura del ABS. Adaptado de: [35].	13
Figura 11. Diagrama de ensayo de tracción. Adaptado de: [42].	16
Figura 12. Diagrama esfuerzo deformación. Adaptado de: [45].	17
Figura 13. Curva de fluencia continua. Adaptado de: [48].	19
Figura 14. Determinación del esfuerzo a la fluencia por el método de desplazamiento 0,20%. Adaptado de: [48].	20
Figura 15. Determinación del esfuerzo a la fluencia por el método de extensión 0,50%. Adaptado de: [48].	20
Figura 16. Curva esfuerzo deformación con fluencia discontinua. Adaptado de: [48].	21
Figura 17. Resistencia a la fluencia en la curva esfuerzo-deformación con fluencia discontinua. Adaptado de: [48].	21
Figura 18. Resumen del proceso. Fuente: Autor.	25
Figura 19. Probeta diseñada en base a la norma ASTM D638-02a [50]. Fuente: Autor.	26
Figura 20. Proceso para transformar a un formato STL en el software Inventor. Fuente: Autor.	26
Figura 21. Software Cura utilizado para rebanado de sólido. Fuente: Autor.	27
Figura 22. Extrusora de filamento Filabolt. Fuente: Autor.	28
Figura 23. Filamento extruido para ingresarlo a la impresora 3D. Fuente: Autor.	28
Figura 24. Pruebas de impresión. Fuente: Autor.	29

Figura 25. Máquina de ensayos de tracción. Fuente: Autor.....	30
Figura 26. Valores de esfuerzo máximo con un 40% de densidad de relleno. Fuente: Autor.	32
Figura 27. Valores de esfuerzo máximo con un 80% de densidad de relleno. Fuente: Autor.	33
Figura 28. Valores elongación con un 40% de densidad de relleno. Fuente: Autor.	33
Figura 29. Valores elongación con un 80% de densidad de relleno. Fuente: Autor.	34
Figura 30. Curvas esfuerzo deformación del ABS, PLA y PLA/MLO 5phr al 40% de densidad. Fuente: Autor.	46
Figura 31. Curvas esfuerzo deformación del ABS, PLA y PLA/MLO 5phr al 80% de densidad. Fuente: Autor.	46
Figura 32. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 1. Fuente: Autor.....	60
Figura 33. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 2. Fuente: Autor.....	60
Figura 34. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 3. Fuente: Autor.....	60
Figura 35. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 4. Fuente: Autor.....	61
Figura 36. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 5. Fuente: Autor.....	61
Figura 37. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 6. Fuente: Autor.....	61
Figura 38. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 7. Fuente: Autor.....	62
Figura 39. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 9. Fuente: Autor.....	62
Figura 40. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 10. Fuente: Autor.....	62
Figura 41. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 11. Fuente: Autor.....	63
Figura 42. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 12. Fuente: Autor.....	63
Figura 43. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 13. Fuente: Autor.....	63
Figura 44. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 14. Fuente: Autor.....	64
Figura 45. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 15. Fuente: Autor.....	64
Figura 46. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 16. Fuente: Autor.....	64
Figura 47. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 17. Fuente: Autor.....	65
Figura 48. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 18. Fuente: Autor.....	65
Figura 49. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 19. Fuente: Autor.....	65
Figura 50. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 20. Fuente: Autor.....	66
Figura 51. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 21. Fuente: Autor.	66
Figura 52. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 22. Fuente: Autor.....	66

Figura 53. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 23. Fuente: Autor.....	67
Figura 54. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 24. Fuente: Autor.....	67
Figura 55. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 25. Fuente: Autor.....	67
Figura 56. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 26. Fuente: Autor.....	68
Figura 57. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 27. Fuente: Autor.....	68
Figura 58. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 28. Fuente: Autor.....	68
Figura 59. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 29. Fuente: Autor.	69
Figura 60. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 31. Fuente: Autor.	69
Figura 61. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 32. Fuente: Autor.	69
Figura 62. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 33. Fuente: Autor.	70
Figura 63. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 34. Fuente: Autor.	70
Figura 64. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 35. Fuente: Autor.	70
Figura 65. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 36. Fuente: Autor.	71
Figura 66. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 37. Fuente: Autor.	71
Figura 67. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 39. Fuente: Autor.	71
Figura 68. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 40. Fuente: Autor.	72
Figura 69. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 41. Fuente: Autor.	72
Figura 70. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 42. Fuente: Autor.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de la impresora BCN3D+. Fuente: [28].	10
Tabla 2. Componentes del cabezal. Fuente: [28].	10
Tabla 3. Propiedades mecánicas y físicas del ABS. Fuente: [37].	14
Tabla 4. Propiedades mecánicas y físicas del PLA. Fuente: [39].	15
Tabla 6. Tabla de valores piloto. Fuente: Autor.	24
Tabla 5. Configuraciones colocadas en el software CURA. Fuente: Autor.	27
Tabla 7. Características del lote impreso. Fuente: Autor.	29
Tabla 8. Base de datos del lote de probetas. Fuente: Autor.	31
Tabla 9. Tabla resumen de resultados. Fuente: Autor.	32
Tabla 10. Resumen estadístico para el esfuerzo del PLA y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	36
Tabla 11. Tabla ANOVA para el esfuerzo entre el PLA y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	36
Tabla 12. Corrección Bonferroni esfuerzo PLA y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	37
Tabla 13. Resumen estadístico para el esfuerzo del PLA y ABS. Fuente: Autor.	37
Tabla 14. Tabla ANOVA para el esfuerzo entre el PLA y ABS. Fuente: Autor.	38
Tabla 15. Corrección Bonferroni esfuerzo PLA y ABS. Fuente: Autor.	38
Tabla 16. Resumen estadístico para el esfuerzo del ABS y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	39
Tabla 17. Tabla ANOVA para el esfuerzo entre el ABS y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	39
Tabla 18. Corrección Bonferroni esfuerzo ABS y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	40
Tabla 19. Resumen estadístico para la elongación del PLA y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	40
Tabla 20. Tabla ANOVA para la elongación entre el PLA y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	41
Tabla 21. Corrección Bonferroni elongación PLA y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	41
Tabla 22. Resumen estadístico para la elongación del PLA y ABS. Fuente: Autor.	42
Tabla 23. Tabla ANOVA para la elongación entre el PLA y ABS. Fuente: Autor.	42
Tabla 24. Corrección Bonferroni elongación PLA y ABS Fuente: Autor.	43

Tabla 25. Resumen estadístico para la elongación del ABS y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	43
Tabla 26. Tabla ANOVA para la elongación entre el ABS y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.	44
Tabla 27. Corrección Bonferroni elongación ABS y PLA/MLO 5phr. Fuente: Autor.....	44
Tabla 28. Resumen de análisis ANOVA. Fuente: Autor.....	45

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D mediante la deposición de hilo fundido (FDM) en la actualidad genera un gran interés, debido a la posibilidad de desarrollar objetos tridimensionales que parten de un diseño computacional para posteriormente obtener un elemento sólido, utilizado en diversas aplicaciones o en su defecto desarrollos tecnológicos, evitando el desperdicio de material como es el caso de la fabricación con arranque de viruta.

Para el proceso de impresión 3D, es indispensable contar con las características térmicas del material. El grupo de materiales que posee propiedades idóneas para la aplicación de esta tecnología son los polímeros, sin embargo, es necesario recordar que los materiales poliméricos constituyen un gran problema para el medio ambiente debido a la contaminación que generan y su bajo grado de degradación.

Una solución para disminuir los problemas generados por los materiales poliméricos es el uso de polímeros de origen natural, que ya desde el año 1950 estaban ya en investigación, esto dado que su proceso de degradación no tarda un tiempo prolongado, caso contrario sucede con los polímeros de origen fósil que pueden tardar hasta 6 millones de años en su descomposición, por lo que ha dado lugar que en ciertos países se crearan leyes para prohibir la producción de ciertos tipos de polímeros [1].

Existen los polímeros sintéticos biodegradables fabricados a base de petróleo, pero debido a la contaminación ambiental que está sufriendo el planeta y el agotamiento de los aceites fósiles, los polímeros sintéticos no son la primera opción para usarlos en la industria [2, 3].

Los materiales más comerciales para el proceso de impresión 3D, son el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) el cual es un material derivado del petróleo y el ácido poliláctico (PLA) obtenido de la lactida de las plantas por lo que cuenta con características biodegradables y de origen natural [4].

En este proyecto se pretende analizar un material obtenido a partir de la mezcla del PLA con MLO, comparar su comportamiento con PLA y ABS comercial. El material analizado (PLA/MLO) se lo probará posteriormente en análisis de crecimiento celular puesto que el PLA con el plastificante MLO son compatibles con el cuerpo humano [3, 5, 6]. El aceite de linaza tiene un origen vegetal que reacciona con el anhídrido maleico,

generando de esta reacción el aceite de linaza maleinizado (MLO), que puede ser usado para modificar las propiedades del PLA actuando como un plastificante natural, que al ser amigable con el medio ambiente y tener un costo accesible podría dar excelentes resultados mecánicos [5 - 7].

Como se pretende generar un estudio con una mezcla de polímero con plastificante se espera mejorar la elongación de los productos finales y de esa manera obtener productos que puedan ayudar al desarrollo académico y se apliquen a proyectos innovadores. Además, al analizar densidades diferentes de relleno se puede asegurar que un cuerpo con mayor relleno tenderá a poseer un mejor comportamiento mecánico frente a un cuerpo con un interior menos denso.

2. PROBLEMA

El grupo de investigación en nuevos materiales y procesos de transformación (GiMaT) de la Universidad Politécnica Salesiana, ha desarrollado investigaciones referentes a nuevos materiales para su posterior uso industrial. La técnica de impresión 3D nace de la necesidad de desarrollar nuevos procesos de producción que optimicen los recursos de materia prima y además brinden la facilidad de obtener productos diversos con casi cualquier forma partiendo de un modelo digital computarizado. Resulta imprescindible conocer las propiedades de los productos obtenidos mediante este proceso, uno de los ensayos que permiten conocer su esfuerzo máximo es el ensayo de tracción. Dentro del proceso de impresión existen diversos parámetros a controlar los cuales pueden ser la temperatura, densidad de relleno, patrón de relleno, entre otros. Al realizar un análisis estadístico con los diferentes materiales y sus niveles de densidad, se puede llegar a determinar la variabilidad existente en los datos obtenidos en el ensayo de tracción.

Dado que el proceso de impresión 3D puede generar piezas con diferentes porcentajes de porosidad, se podría aplicar para un proceso de crecimiento celular, aprovechando la biocompatibilidad que presenta el PLA y el MLO, esperando mejorar las propiedades de elongación del PLA, haciéndolo menos frágil.

2.1 Antecedentes

El prototipado rápido es un proceso de manufactura aditiva asistida por computador, mediante el cual se generan piezas tridimensionales en base a la consolidación de material en diferentes niveles o capas [10].

La tecnología de impresión 3D hoy en día es un proceso muy utilizado en prótesis o implantes de órganos, contribuyendo de una manera positiva al campo de la medicina, sin embargo, existen otras aplicaciones como son el desarrollo del marketing, difusión de marcas e incluso técnicas que contribuyan con la educación. Marcando una nueva revolución industrial en el desarrollo de procesos de fabricación [11].

Para aplicaciones biomédicas donde se requiera la realización de un crecimiento celular es necesario tener una estructura o andamio en 3D que tenga orificios o poros los cuales varíen entre 100 y 500 μm , dependiendo del crecimiento celular a realizar. Un relleno de entre el 40% y el 75% generan un espacio de entre 300 y 380 μm manteniéndose dentro del límite para la realización de un crecimiento celular [9]. Por otro lado, un relleno al 100% no permite la generación de un crecimiento celular debido a que sus poros son muy pequeños, y en el caso de necesitar una pieza totalmente sólida se puede especular que es muy difícil controlar la no existencia de espacios dentro del objeto debido al mismo proceso de impresión [12].

Existen muchos factores que determinan las propiedades físicas de una pieza generada en un sistema de impresión 3D, como pueden ser el tipo de material depositado, la cantidad colocada, la homogenización de las capas del material y la configuración realizada de la temperatura, velocidad y flujo. Las variables anteriores permiten diferentes propiedades físicas para satisfacer las necesidades de aplicaciones específicas como la construcción de maquetas, prototipos, visualización de conceptos entre otros [13].

En el Ecuador aún no se están utilizando las impresoras 3D en el sector industrial como una alternativa de manufactura, más bien, la comercialización de impresoras por deposición fundida que utilizan ABS y PLA como materia prima, para el prototipado de elementos decorativos o maquetas [4].

Cuando se trata de un sólido impreso en 3D mediante tecnología FDM se habla de un sólido con un material no necesariamente homogéneo, dado que puede contener orificios o imperfecciones, cuya anisotropía está fuertemente influenciada por el proceso de fabricación, por ende, las propiedades mecánicas del sólido impreso dependerán directamente de los parámetros utilizados para su fabricación [14].

El valor de la resistencia a la tensión de un proceso FDM se encuentra entre un 65% y 72% del valor de resistencia obtenido en ensayos de probetas de inyección. Además de ello se debe tomar en cuenta que debido a las trayectorias de deposición de material realizadas por la tecnología FDM, se producen discontinuidades en las esquinas redondeadas formándose en ellas concentradores de tensiones [15].

El espesor de capa analizadas para ABS y el PEEK determinan que mejores propiedades mecánicas se obtiene con un valor de 0,3 mm y un patrón lineal recto a 0° y 90° [16].

2.2 Importancia y alcances

La impresión 3D es una tecnología de fabricación emergente con un alto potencial en campos biomédicos como la generación de tejidos o en su defecto órganos. Se dice que con la inclusión de andamios biomiméticos generados por impresión, pueden generar un método muy alentador para reparaciones del sistema nervioso tanto de la médula espinal como de nervios periféricos [17]. Como principal ventaja se tiene su bajo costo, fácil operación y versatilidad en su operación dado que se puede llegar a tener implantes personalizados de forma exitosa, rápida y económica en clínicas médicas [18].

El mercado para las impresoras 3D es muy generoso debido a que además de la venta de las mismas impresoras, se deriva todo lo relacionado con mantenimiento, distribución de insumos, asesoramiento técnico, así como los mismos objetos impresos, por lo que promueve nuevas oportunidades para el emprendimiento y nuevas plazas de empleo [19].

Se aportará la metodología implementada para la obtención del material mezclado válido para el proceso de impresión 3D, y además las configuraciones necesarias a realizar

dentro del software de la impresora BCN3D+ que brinden un producto impreso de calidad y que cumpla con la normativa de ensayos a tracción.

El presente trabajo investigativo aportara a la comunidad científica y al grupo GiMaT con un estudio minucioso de las características mecánicas obtenidas del ensayo de tracción efectuado en probetas impresas, con PLA, ABS y PLA/MLO 5phr. Con estos datos se podrá comparar entre uno u otro material, cuantificar las propiedades que van a poseer los productos futuros impresos con estos materiales, y además se da un aporte al proyecto “Simulación y Prototipado mediante técnica aditiva 3D usando materiales orgánicos e inorgánicos” aprobado por el consejo de investigación de la Universidad Politécnica Salesiana, con RESOLUCIÓN N° 004-008-2016-12-15, que está bajo la dirección del Dr. Luis Eduardo Garzón Muñoz, miembro del Grupo de Investigación en Nuevos materiales y Procesos de transformación (GiMaT).

2.3 Delimitación

Los materiales a analizar son el PLA y el ABS en su estado natural y una mezcla de PLA/MLO 5phr con densidades del 40 y 80%. Este proyecto será realizado en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, utilizando el equipo Filabolt, para la obtención de material para el proceso de impresión 3D, posteriormente se procederá a la impresión de las probetas diseñadas bajo la norma ASTM D-638, e impresas en la impresora BCN3D+, finalmente, el ensayo será realizado en el equipo Test Resource del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar los parámetros de ensayo de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS, PLA/MLO 5phr.

3.2 Objetivos específicos

- Establecer los parámetros de impresión 3D idóneos para cada material analizado.
- Analizar la influencia del MLO en la elongación de las probetas impresas.
- Determinar la influencia de la densidad de impresión (relleno) en el esfuerzo a tracción.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Proyecto RepRap

El proyecto RepRap comienza en el año 2005 de las manos del británico Adrián Bowyer, con la finalidad de la creación de una impresora 3D open source que tenga la opción de autorreplicarse, es decir que pudiera imprimirse a ella misma para fabricar otra impresora con las mismas o mejores prestaciones que la original, todas sus partes han sido seleccionadas para ser fabricados por materiales estándares que se encuentren disponibles a bajo costo en todo el mundo [18, 19].

La primera impresora construida en el año 2007, fue la Darwin (Figura 1) la cual fue la primera máquina de prototipado rápido, tiene una forma de cubo cuyas medidas son 500 mm por cada lado aproximadamente, a esta impresora le sigue la Mendel fabricada en octubre del 2009, y luego por la Prusa Mendel y Huxley en 2010, siendo las ultimas los modelos de impresoras con mayor presencia en el mercado [18, 20].

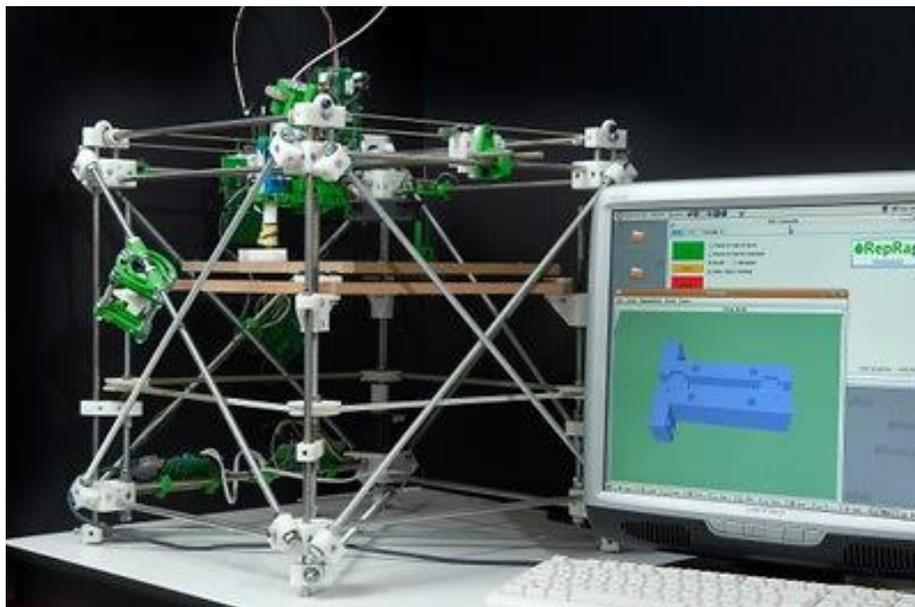


Figura 1. Primera impresora 3D construida en 2007 denominada Darwin. **Adaptado de:** [20].

Uno de los miembros del proyecto RepRap llamado Zach Smith ha creado un sitio web llamado Thingiverse en donde cualquiera puede subir y descargar diseños de manera gratuita para su posterior impresión por cualquier máquina de prototipado rápido, teniendo una amplia plataforma de objetos a imprimir de tal manera que esta tecnología se encuentre al alcance de muchas personas [20, 21].

Además de la plataforma Thingiverse se pueden nombrar páginas como Autodesk 123D, 3D CAD browser en donde no todos sus modelos son adecuados para la impresión a bajo costo, GrabCAD la cual es una plataforma de gran importancia teniendo piezas mecánicas perfectamente diseñadas, Shapeways donde incluso se puede pedir objetos impresos los cuales son enviados a un precio razonable y finalmente se pueden encontrar páginas como 3D warehouse, y 3Dvia que poseen diversos diseños los cuales tienen múltiples aplicaciones [22, 23].

En el proyecto RepRap ocupa una tecnología de fabricación denominada FFF, la cual es el equivalente de la tecnología FDM, esto con el objetivo proporcionar una frase sin limitaciones legales para su uso, puesto que la abreviatura FDM es propiedad de Stratasys Inc [24].

4.2 Tecnología FDM

La tecnología FDM o modelado por deposición fundida es un método de manufactura aditiva que consiste principalmente en el depósito capa a capa de material fundido sobre una superficie completamente plana el cual se mantiene en constante movimiento. A más de ello cuenta con un sistema de arrastre que permite al material ingresar con un flujo continuo de tal manera que no sea interrumpido la deposición capa a capa del material dentro del pieza producida.

El proceso de modelado por deposición fundida, deposita el material por capas para realizar el conformado de la pieza. El material o filamento utilizado que viene en una presentación en forma de rollos, el cual es introducido a un proceso de extrusión, donde es fundido por medio de un sistema calefactor, dependiendo del modelo de la impresora, el cabezal extrusor puede generar los tres movimientos “x”, “y”, “z” o puede ser alternado, pues el movimiento en el eje “y” es generado por la base calefactora donde se deposita el material y los ejes “x”, “z” los da el cabezal extrusor, por lo general los movimientos de “x”, “y”, “z” se los realiza por medio de motores de paso o servos motores [25]. En la figura 2 se encuentra un esquema de la impresora 3D por deposición de hilo fundido.

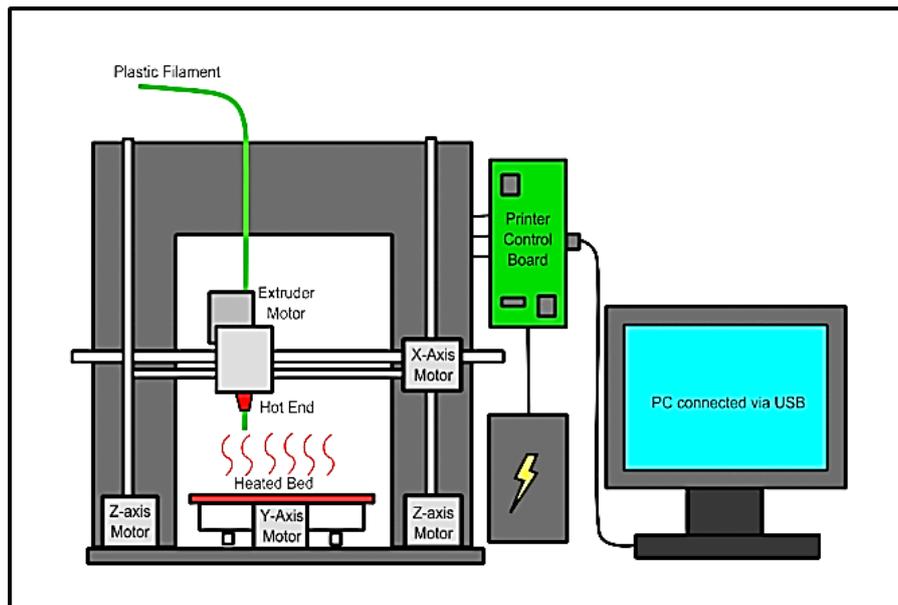


Figura 2. Impresora 3D de modelado por deposición fundida (FDM). Adaptado de: [26].

La principal ventaja de esta tecnología es que ha permitido poner a la impresión 3D al alcance de cualquier persona, debido a que la máquina no necesita un gran espacio físico y requiere una baja potencia, por lo que su instalación puede ser realizada en ambientes no industriales [24, 25].

Las piezas obtenidas mediante este proceso pueden resistir calor, químicos, entornos húmedos y tensión mecánica, sin embargo, se debe acotar que la impresión de un objeto puede durar varias horas, dependiendo del tamaño, complejidad del modelo, tipo de maquinaria y el número de piezas a fabricarse simultáneamente [28].

Es muy importante que el material se encuentre almacenado en lugares secos antes de ser extruido, esto con el fin de evitar que la humedad durante el proceso de extrusión forme burbujas en el material e impida la continuidad de la deposición. Con este tipo de tecnología se logra un bajo porcentaje de desperdicio de material y poca necesidad de limpieza [27].

4.3 Proceso de impresión

Para el proceso de impresión es necesario cumplir ciertos pasos para llegar a tener un producto impreso similar al diseñado en el software 3D, para ello en la figura 3 se muestra los pasos esenciales a cumplir dentro de una impresión.



Figura 3. Proceso de impresión. **Fuente:** [29].

4.4 Componentes de la impresora 3D con tecnología FDM

La impresora 3D con tecnología FDM posee varios componentes que se detallarán en la figura 4 y figura 5.

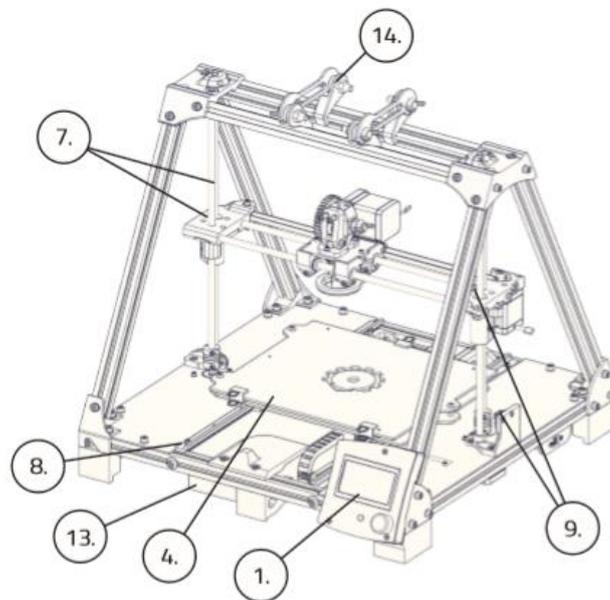


Figura 4. Impresora BCN3D+. **Adaptado de:** [30].

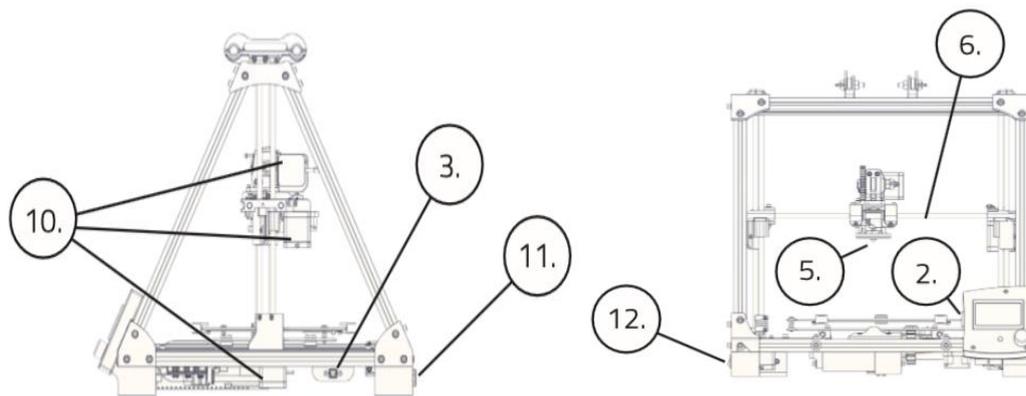


Figura 5. Impresora BCN3D+ vista lateral y frontal. Adaptado de: [30].

Tabla 1. Componentes de la impresora BCN3D+. Fuente: [30].

1	Pantalla LCD	8	Guías lineales eje Y
2	Ranura tarjeta SD	9	Finales de carrera mecánicos
3	Conector USB	10	Motores paso a paso
4	Hotend (base calefactora)	11	Toma de corriente
5	Hotend (Extrusor)	12	Botón de encendido
6	Guías eje X	13	Fuente de alimentación
7	Varillas roscadas y guías eje Z	14	Soporte de bobina

Como subconjunto principal se tiene el cabezal, el cual es el encargado de alimentar a la impresora con el material, en la figura 6 se detallará los componentes del cabezal.

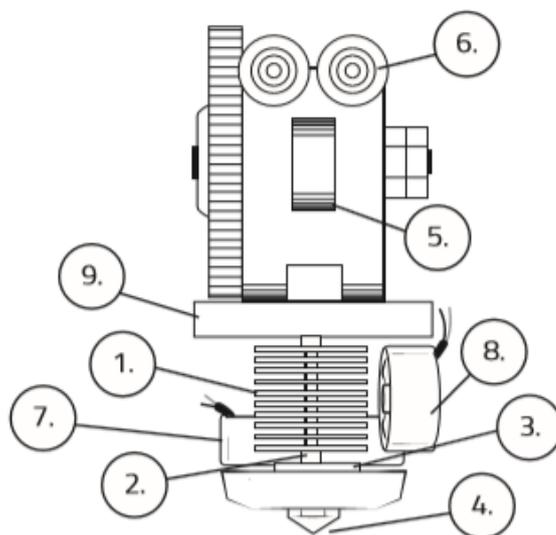


Figura 6. Cabezal de impresora BCN3D+. Adaptado de: [30]

Tabla 2. Componentes del cabezal. Fuente: [30].

1	Disipador de calor	6	Tornillo de apriete
2	Barrera térmica	7	Ventilador de capa
3	Bloque calefactor	8	Ventilador Hotend
4	Boquilla (nozzle)	9	Carro eje X
5	Balancín		

4.5 Parámetros involucrados en el proceso de impresión

4.5.1 Espesor de capa

Este parámetro de impresión, corresponde al grosor de cada capa de filamentos que deposita la boquilla extrusora. Este parámetro define la resolución en el eje Z, afectando directamente el número de capas que compone al objeto impreso, el acabado o rugosidad que tendrá el objeto, como norma general cuanto mayor sea la altura de capa, menos calidad tendrá nuestra pieza, como se muestra en la figura 4. Dicho de otra manera, a menor altura de capa, mayor tiempo de impresión [12].

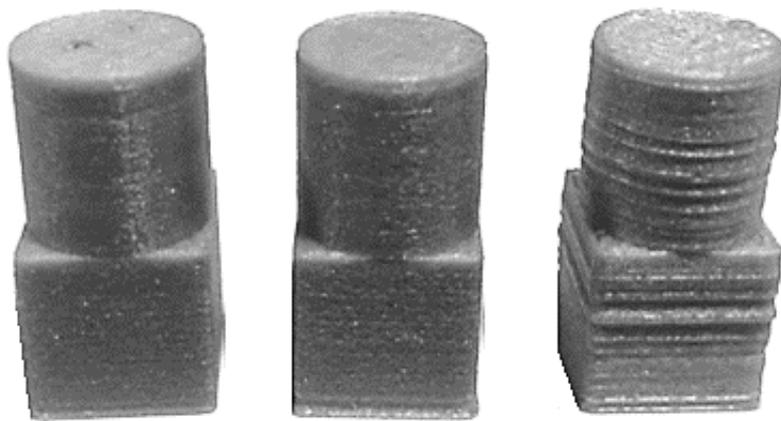


Figura 7. Influencia del espesor de capa en el acabado superficial. **Adaptado de:** [31].

Hay que tener en cuenta que este parámetro debe estar relacionado con el diámetro de nuestra boquilla, si la altura de capa es menor que el 50%-60% del diámetro de la boquilla, la calidad de la pieza podría verse afectada. Con una capa de 0,3 mm, se encuentra las mejores propiedades mecánicas para impresión 3D [12, 47].

4.5.2 Densidad de relleno

Se puede definir como la cantidad de material colocado en estructura impresa, es decir no considera la porción de vacío [12]. La densidad de relleno se expresa en formato decimal, 0.1 para un 10% de relleno, 0.9 para un 90%. Es posible configurar el relleno al 0% (0), para realizar piezas huecas o modelos vacíos y también al 100% (1) para obtener piezas totalmente rellenas. A mayor porcentaje de relleno, mayor será la cantidad de material, por ende, mayor el tiempo de impresión [32]. En la figura 8 se encuentra una demostración de los diferentes porcentajes de relleno que pueden ser determinados.

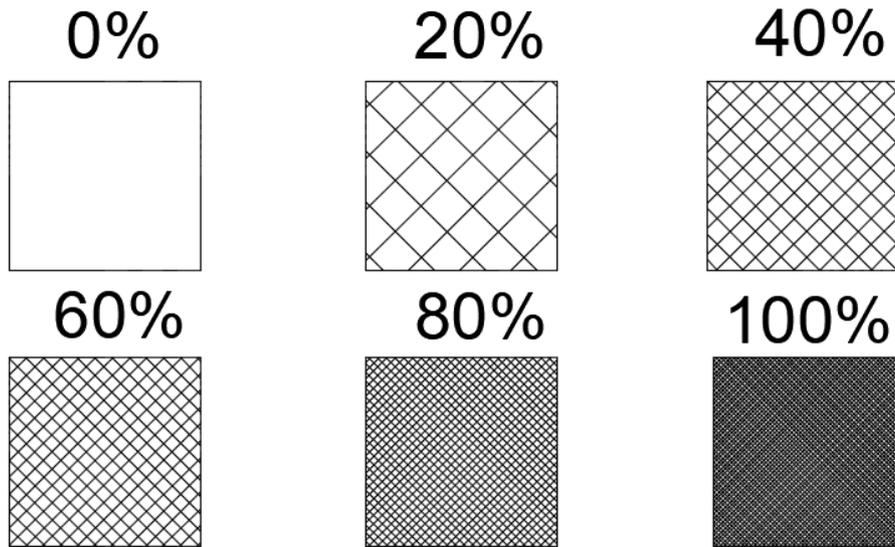


Figura 8. Representación del porcentaje de relleno que puede tener una pieza impresa. **Fuente:** Autor.

4.5.3 Patrón de relleno

El patrón de relleno es el parámetro que define la estructura interna que deberá tener la pieza impresa en todas sus capas exceptuando la superior e inferior. Se puede elegir entre varias alternativas como pueden ser de tipo rectilíneos, panel de abeja, concéntrico, triangular, rectangular, etc. Con el fin de adaptarse de mejor manera a la pieza a imprimir [33]. En la figura 9 se pueden observar varios patrones de relleno para ser utilizados por la tecnología FDM.

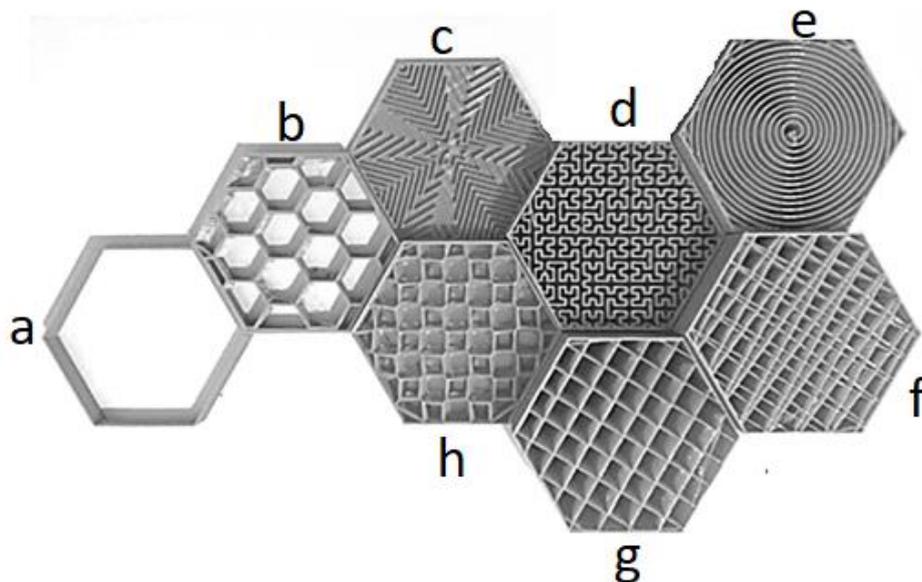


Figura 9. Patrón de relleno: a) Sin relleno, b) Honeycomb, c) Octaedro d) Hilbert e) Archi f) Line g) Grid h) Rectilíneo. **Adaptado de:** [34].

4.6 Materiales utilizados en la impresión 3D por FDM

Para la impresión 3D mediante modelado por deposición fundida es necesario tener un filamento de material el cual mantenga un diámetro constante para evitar problemas de flujo de material [3]. Las bobinas de filamento comercialmente tiene un diámetro de 1,75 mm hasta 3 mm, siendo los materiales más comerciales el PLA y el ABS [35].

4.6.1 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El ABS es un termoplástico que surge por la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno, es decir es un copolímero, resultado de la combinación de los tres monómeros. Las porciones pueden variar del 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno [36]. En la figura 10 se encuentra la composición de la estructura del ABS.

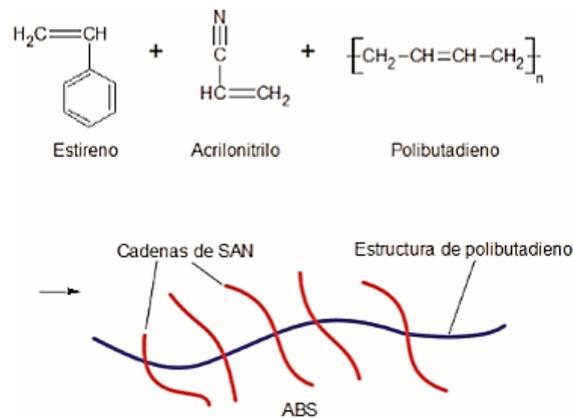


Figura 10. Estructura del ABS. Adaptado de: [37].

El ABS es un material amorfo, es decir que no tiene temperatura de fusión verdadera y esta se encuentra en un rango de 220 a 240°C, y cuenta con buenas propiedades mecánicas haciéndolo uno de los materiales más usados por la tecnología de manufactura aditiva FDM [12]. Es considerado un plástico de ingeniería, porque su elaboración y procesamiento es algo más complejo que en los plásticos comunes [38].

El ABS se originó por la necesidad de mejorar algunas propiedades del poliestireno de alto impacto. Para obtenerlo se mezclan emulsiones de dos polímeros, SAN y polibutadieno. La mezcla que se la realiza es coagulada para obtener ABS [37].

4.6.1.1 Propiedades del ABS

En la tabla 3 se puede encontrar las propiedades mecánicas y físicas obtenidas del ABS.

Tabla 3. Propiedades mecánicas y físicas del ABS. Fuente: [39].

Propiedades mecánicas y físicas del ABS	
Módulo elástico	1.1 – 2.9 GPa
Coefficiente de Poisson	0,391 – 0,422
Resistencia mecánica a la compresión	31 – 86,2 MPa
Resistencia mecánica a la flexión	47,8 – 76 MPa
Resistencia mecánica a la tracción	27,6 – 55,2 MPa
Temperatura de transición vítrea	87,9 – 118 °C
Temperatura de fusión	200 – 245 °C

4.6.2 PLA

El PLA (Ácido Poliláctico) es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Puede obtenerse por dos vías: la química o la biotecnológica. La producción química está basada en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico para dar así lactonitrilo, el cual se hidroliza para obtener ácido láctico. La parte biotecnológica está basada en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por microorganismos [40].

PLA se puede producir mediante la polimerización por condensación directamente de su ácido láctico, éste se deriva de la fermentación de la glucosa de las fuentes de carbohidratos como el maíz, caña de azúcar, trigo, papa [41].

La biodegradación del PLA se basa en la presencia de microorganismos que colonizan la superficie del polímero y son capaces de segregar enzimas que rompen en pequeños fragmentos el polímero; la colonización de la superficie depende de factores tales como la tensión superficial, porosidad, textura superficial y accesibilidad a las cadenas de polímeros. Las condiciones necesarias para que se pueda producir la biodegradación son: presencia de microorganismo, oxígeno, humedad, nutrientes minerales, temperaturas entre 20 a 60 °C dependiendo del microorganismo y un pH entre 5-8 [40].

4.6.2.1 Propiedades del PLA

El PLA como polímero, ofrece numerosas propiedades tanto mecánicas como químicas; principalmente destacamos su biocompatibilidad (puede ser utilizado en algún implante o prótesis) y las buenas propiedades de barrera que posee [41]. En la tabla 4 se encuentran las propiedades mecánicas y físicas del PLA.

Tabla 4. Propiedades mecánicas y físicas del PLA. Fuente:[41].

Propiedades mecánicas y físicas del PLA	
Módulo elástico	3 – 4 GPa
Alargamiento a la rotura	2 – 5 %
Resistencia mecánica a la flexión	100 MPa
Resistencia mecánica a la tracción	27 – 41 MPa
Temperatura de transición vítrea	60 – 70 °C
Temperatura de fusión	170 – 200 °C

4.6.3 Plastificante MLO

En los últimos años varios aceites vegetales han sido modificados para utilizarlos como plastificantes contribuyendo positivamente al medio ambiente [42].

Los avances recientes en ingeniería genética, ciencia compuesta y el desarrollo de fibra natural, ofrecen grandes oportunidades para desarrollar nuevos materiales y mejorarlos a partir de recursos renovables que pueden biodegradarse o reciclarse con facilidad, por lo que mejora la sostenibilidad global [38].

Se puede fabricar una amplia gama de materiales de alto rendimiento y bajo costo utilizando aceites vegetales. Al seleccionar la función de distribución de los ácidos grasos de los aceites vegetales a través de la simulación de un ordenador y la conectividad molecular, podemos controlar la funcionalidad química y la arquitectura molecular para producir polímeros lineales, ramificados o reticulados. Estos materiales se pueden utilizar como plastificantes, adhesivos sensibles a la presión, elastómeros, cauchos y resinas compuestas [40].

El MLO al mezclarse con un Polímero biodegradable, ayuda a mejorar sus características como su tenacidad, ductilidad y elongación, un efecto del uso del MLO en un polímero es la disminución de la temperatura de transición vítrea (T_g), esto dependerá de la cantidad empleada de MLO [9].

El aceite de linaza se utiliza como un compatibilizador de origen natural para mezclas inmiscibles [41], en tanto el PLA es uno de los polímeros más prometedores para reemplazar los polímeros a base de petróleo, principalmente en la industria del envasado, debido a sus propiedades mecánicas equilibradas, buen comportamiento de barrera química, inodoro, biocompatible. Uno de los principales inconvenientes del PLA es su sensibilidad a la humedad, baja flexibilidad, bajo alargamiento a la rotura y baja tenacidad. Una solución rentable, para mejorar estos inconvenientes, es el uso de plastificantes naturales, como los aceites vegetales.

4.7 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta a un esfuerzo axial progresivo hasta llegar a producir una rotura en la probeta, de tal manera que se pueda medir la resistencia de un material a una fuerza aplicada lentamente [43].

La máquina de ensayo (figura 11), deforma la probeta previamente obtenida desplazando el cabezal móvil a una velocidad determinada. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas están conectadas a un computador que registra el desplazamiento y la carga aplicada [44].

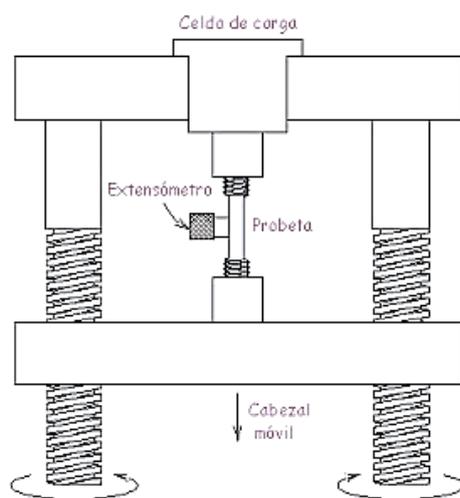


Figura 11. Diagrama de ensayo de tracción. Adaptado de: [44].

esfuerzo denominado límite de proporcionalidad σ_y . En este punto se cumple la ley de Hooke. La pendiente de este tramo determina el valor del módulo de elasticidad o de Young [48].

- Tramo elástico OB: En este tramo se produce una descarga de forma elástica, es decir, en este punto si se aplica una carga a la probeta la misma regresará a su posición inicial sin sufrir mayor cambio, el esfuerzo máximo que se puede producir sin provocar deformaciones permanentes se denomina límite elástico σ_e . El tramo AB es un comportamiento elástico no lineal el cuál dependiendo del material será más o menos notorio [46, 47].
- Tramo plástico BD: En este tramo se observa deformación permanente al descargar la probeta, produciéndose además el límite de fluencia σ_f , en este punto la deformación deja de ser proporcional a la carga proporcionada [46, 47].
- Tramo de fluencia CD: En este tramo la deformación aumenta sin que se produzca un aumento apreciable de la tensión. Hasta llegar al punto D la deformación longitudinal y las deformaciones transversales son sensiblemente uniformes a lo largo de la longitud útil de la probeta [48].
- Tramo de endurecimiento por deformación DE: A partir de un determinado valor de deformación, la tensión necesaria para seguir aumentando la deformación plástica se incrementa, generándose un fenómeno denominado endurecimiento por deformación, encontrándose aquí el esfuerzo máximo [48].
- Tramo de estricción EF: En este último tramo el material se va poniendo menos tenso hasta llegar a conseguir su fractura provocada por un estiramiento tan grande que el material termina rompiéndose, en esta zona el diagrama esfuerzo deformación tiende a curvarse hacia abajo hasta que la probeta se rompa en el punto de esfuerzo de fractura o último [41, 47].

4.7.2 Resistencia a la fluencia

Es el valor de esfuerzo que separa las zonas elásticas y plásticas para un material, un pequeño aumento en el esfuerzo por encima del límite elástico producirá un colapso en el material provocando una deformación permanente, este fenómeno se produce cuando un material se deforma sin la necesidad de aumentar la carga [43].

Existen dos tipos de fluencias que se pueden encontrar como son la fluencia continua y la fluencia discontinua.

4.7.2.1 Fluencia continua

Se caracteriza por una curva suave donde no se presenta un área de fluencia definida por lo que es imposible determinar la transición elástica plástica.

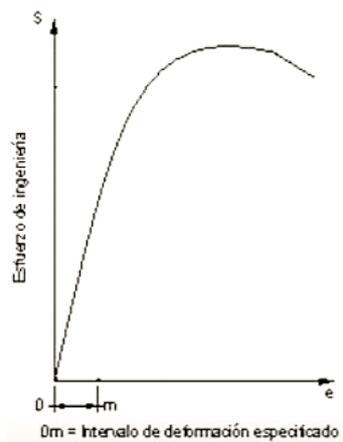


Figura 13. Curva de fluencia continua. Adaptado de: [50].

Para el cálculo de la fluencia continua se lo puede realizar por dos métodos llamados resistencia a la fluencia por desplazamiento especificado y por extensión bajo carga especificada.

Resistencia a la fluencia por desplazamiento especificado (offset): Es el esfuerzo al cual el material ha sido deformado plásticamente por una cantidad igual a un intervalo de deformación especificada. Este esfuerzo se ubica en el punto donde se intercepta la curva esfuerzo-deformación con una línea pendiente igual al módulo de elasticidad y trazada de modo que esta se encuentre desplazada de la porción lineal de la

curva de esfuerzo deformación una cantidad igual a la deformación especificada. El intervalo más utilizado de deformación es el 0,2% [43].

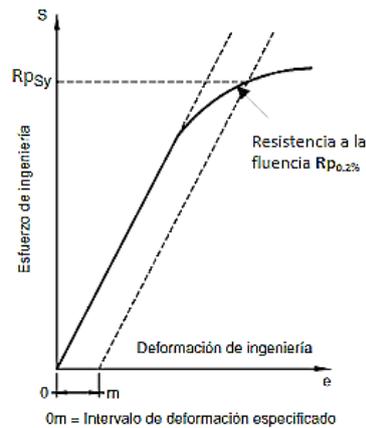


Figura 14. Determinación del esfuerzo a la fluencia por el método de desplazamiento 0,20%. **Adaptado de:** [50].

Resistencia a la fluencia por extensión bajo carga especificada (EUL): En este caso se puede especificar una deformación de 0,5%, este esfuerzo se obtiene en el punto donde se intercepta la curva esfuerzo-deformación con una línea trazada en forma paralela al eje de esfuerzo en la deformación especificada en el eje de deformación [43].

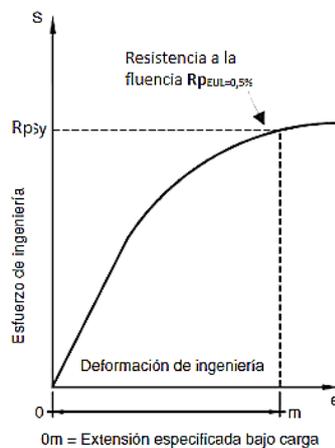


Figura 15. Determinación del esfuerzo a la fluencia por el método de extensión 0,50%. **Adaptado de:** [50].

4.7.2.2 Fluencia discontinua

Se caracteriza por la presencia de una zona de fluctuación de la carga observada inmediatamente después del inicio de la deformación plástica [50]. En la figura 12 se tiene las dos curvas esfuerzo deformación en donde se posee una fluencia discontinua.

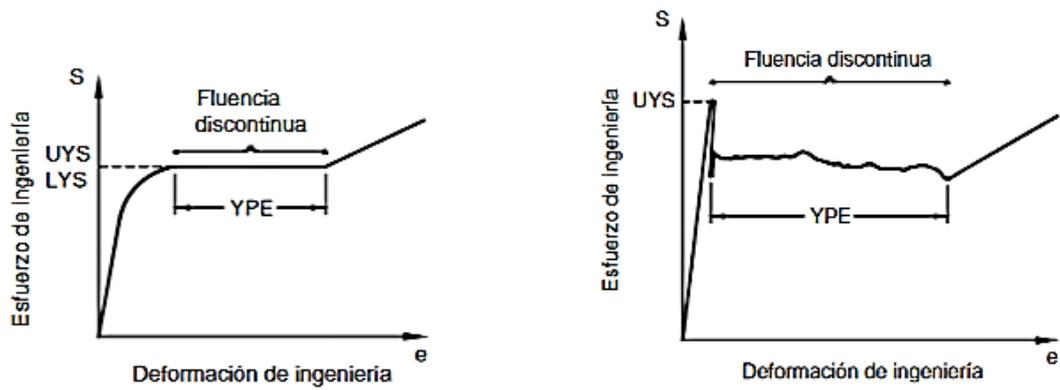


Figura 16. Curva esfuerzo deformación con fluencia discontinua. Adaptado de: [50].

Para determinar la resistencia a la fluencia se analizará el valor que corresponde a la carga máxima de pendiente cero en/o cerca del inicio de la deformación plástica. Físicamente se percibe por el detenimiento o caída del indicador de la máquina de ensayos, teniendo una lectura directa.

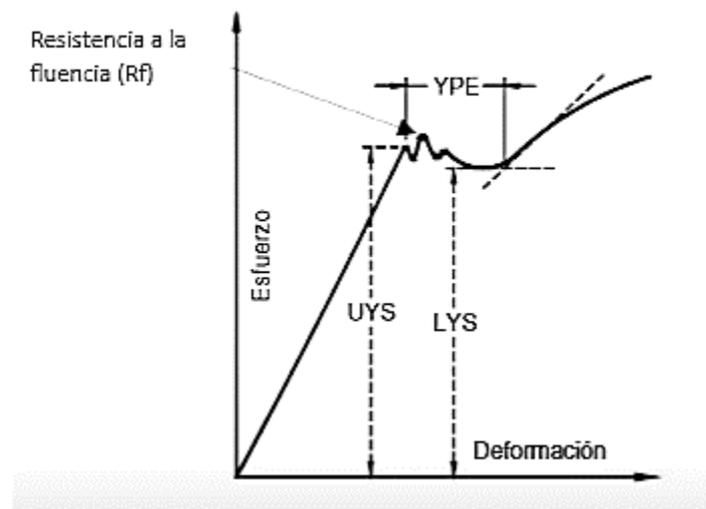


Figura 17. Resistencia a la fluencia en la curva esfuerzo-deformación con fluencia discontinua. Adaptado de: [50].

4.7.3 Resistencia a la tracción

Es el esfuerzo máximo que un material puede resistir, esta es calculada a partir de la carga máxima hallada durante un ensayo de tracción efectuado hasta la rotura y el área de la sección transversal original de la probeta. La carga máxima soportada por la probeta suele ser superior a la carga última de rotura, este es un parámetro esencial debido a que refleja la capacidad resistente del material [43].

Se dice que la resistencia a la tracción es una propiedad intensiva debido a que su valor no depende del tamaño de la muestra, pues sin embargo depende de otros factores como pueden ser la presencia o no de defectos en la superficie de la probeta, la temperatura del entorno de prueba y los materiales analizados [51].

Para los polímeros como grupo de materiales son complicados de clasificar desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, pues sus propiedades difieren mucho de unas familias a otras, la resistencia a la tracción puede ser calculada con la ecuación 1 [4].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

σ : Resistencia a la tracción

F : Fuerza aplicada

A : Área transversal del espécimen

4.7.4 Alargamiento

Es la deformación plástica máxima que recibe un material sometido a un ensayo de tracción, se dice que es el aumento de la longitud final del material con relación a la longitud inicial de la medida y se expresa normalmente como porcentaje de deformación [43]. En la ecuación 2, se expresa la manera de obtener el porcentaje de alargamiento que se obtiene en un ensayo de tracción.

$$\%A = \left(\frac{Lu - Lo}{Lo} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

Lu : Longitud final.

Lo : Longitud inicial.

4.8 Conclusiones

Para mejorar las propiedades del PLA, se realizará una mezcla con plastificante la cual influye directamente en la flexibilidad del producto terminado. El uso de plastificantes naturales como son los aceites vegetales genera una solución rentable. La aplicación del material a impresión 3D, necesitará un acoplamiento al proceso FDM de modo que se pueda imprimir un producto que pueda ser sometido a esfuerzos mecánicos. Para identificar y comparar las propiedades del PLA con o sin MLO es necesario un ensayo que evalúe las características mecánicas de los materiales como es el ensayo de tracción.

5. MARCO METODOLÓGICO

Para analizar el esfuerzo máximo a la tracción y la elongación se imprimió probetas de PLA, ABS y PLA/MLO 5phr, y se empleó un proceso de investigación experimental.

Las densidades de las probetas son de 40 y 80% con un espesor de capa de 0,3 mm y un mallado tipo lineal [7, 10]. Como referencia del tamaño de la muestra se tiene que la norma ASTM D638-2a [52] recomienda al menos 5 probetas, sin embargo a continuación se expone el cálculo del tamaño de muestra para el ensayo:

Los parámetros de cálculo para el tamaño de la muestra son:

Tamaño de población: infinito

Error máximo aceptable: 5%

Porcentaje estimado de la muestra: 50%

Nivel deseado de confianza: 95%

Valor de $z = 1.96$ o $z^2 = 3.84$

Valor de $e = 0.05$ o $e^2 = 0.0025$

Determinación de la desviación estándar:

Para determinar la desviación estándar (SD) se basará en un plan piloto de nueve ensayos de tracción, cogiendo como referencia el valor de esfuerzo máximo. En la tabla 6, se encuentran los valores de un ensayo piloto realizado.

Tabla 5. Tabla de valores piloto. **Fuente:** Autor.

Prueba	Esfuerzo máximo (MPa)
1	11,21
2	8,54
3	14,99
4	16,07
5	12,78
6	16,95
7	10,53
8	8,13
9	11,2
Media	11,9
SD	3,17

Calculo de número de probetas para ensayos de tracción:

$$n = \frac{z^2 \cdot \delta^2}{E}$$

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 3,17^2}{(2 \cdot 3,17)}$$

$$n = \frac{3,84 \cdot 10,04}{(6,34)}$$

$$n = 6,08 \approx 7$$

Según el cálculo realizado se necesita realizar 7 ensayos, por lo tanto, para los tres materiales con sus dos densidades fueron necesarias 7 probetas por variante teniendo un lote de 42 probetas en total. El desarrollo de la investigación se la realizo en varias etapas:

1. **Descriptiva:** revisión bibliográfica referente a las características de los materiales utilizados y el funcionamiento de los equipos utilizados.
2. **Exploratoria:** Capacitación en el manejo y calibración de impresora BCN3D+ con tecnología FDM y el manejo del extrusor Filabolt.

3. **Experimental:** Obtención del material en forma de filamento a partir de la mezcla de PLA y MLO. Impresión de probetas de los materiales a analizar y tracción de los mismos.
4. **Correlacional:** análisis de resultados de las probetas impresas en diferentes densidades, y determinar la influencia del MLO, en el esfuerzo máximo a la tracción y la elongación del PLA en su estado natural con respecto al PLA/MLO 5phr y el ABS.

5.1 Diseño de la investigación

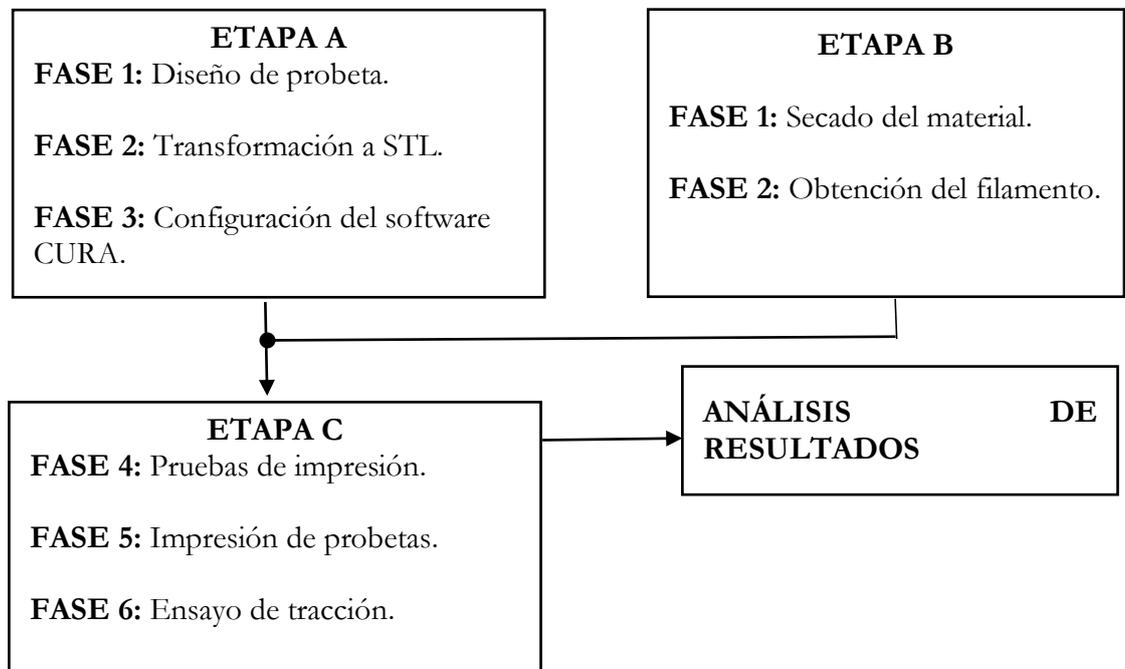


Figura 18. Resumen del proceso. Fuente: Autor.

5.1.1 Etapa A

FASE 1. Diseño de probeta

En esta etapa se revisó la norma ASTM D638-02a [52] y se tomó como referencia la probeta tipo I, la cual fue diseñada en software Inventor Profesional, con las medidas dadas por la norma.

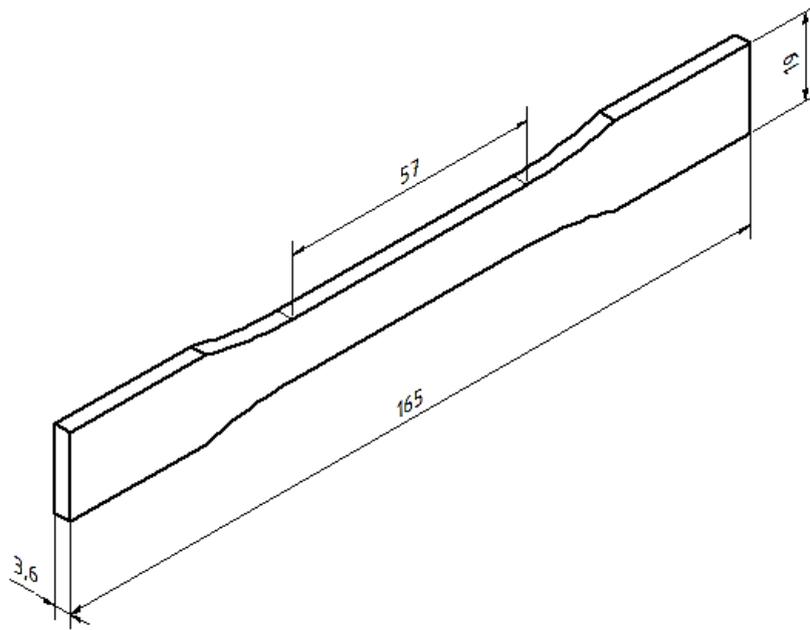


Figura 19. Probeta diseñada en base a la norma ASTM D638-02a [52]. Fuente: Autor.

FASE 2. Transformación a STL.

Para poder ingresar el archivo prediseñado en Inventor al software Cura, es necesario la transformación a la extensión STL el cual es un formato de malla triangular, que ayuda a mejorar la calidad superficial del diseño 3D [25]. En la figura 17 se muestra la opción de transformación a STL en el software Inventor Profesional.

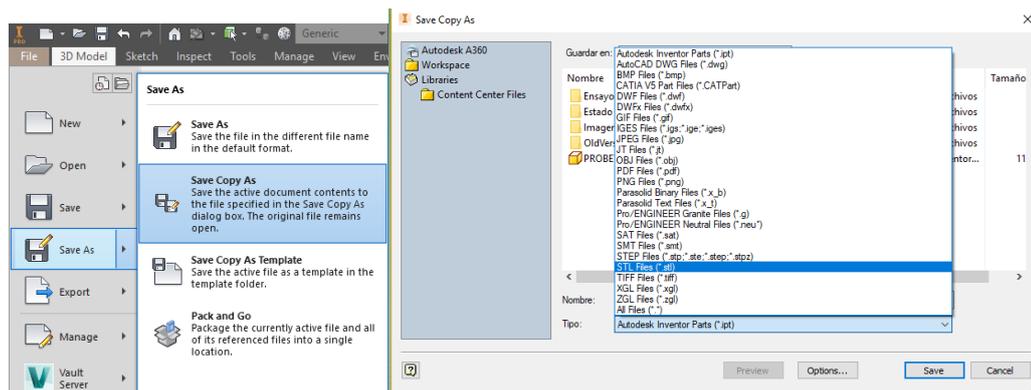


Figura 20. Proceso para transformar a un formato STL en el software Inventor. Fuente: Autor.

FASE 3. Rebanado del sólido

En esta fase se realiza un rebanado del archivo STL en donde se realiza el código G que posteriormente será leído por la tarjeta electrónica de la impresora, el software utilizado es el CURA en su versión 2.5.0



Figura 21. Software Cura utilizado para rebanado de sólido. Fuente: Autor.

La configuración de los parámetros, los cuales depende del material, sin embargo, para el presente proyecto se trató de que la mayoría de los parámetros sean lo más similares. En la tabla 5 que se encuentra a continuación se detalla los parámetros de impresión configurados.

Tabla 6. Configuraciones colocadas en el software CURA. Fuente: Autor.

	ABS	PLA	PLA/MLO 5phr
Altura de capa	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm
Altura de la primera capa	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm
Perímetros	2	2	2
Densidad de relleno	40/80 %	40/80 %	40/80 %
Patrón de relleno	Lineal	Lineal	Lineal
Temperatura de impresión	240°C	215°C	215°C
Temperatura de superficie de impresión	65°C	50°C	50°C
Diámetro de filamento	2,85 mm	2,5 mm	2,5 mm
Flujo	100%	103%	103%
Velocidad de impresión	60 mm/s	60 mm/s	60 mm/s
Secuencia de impresión	Una a la vez	Una a la vez	Una a la vez
Diámetro de nozzle	0,6 mm	0,6 mm	0,6 mm

5.1.2 Etapa B

FASE 1: Secado de material

El PLA es un material sensible a la humedad por lo que es necesario someterlo a un proceso de secado [5, 27, 51]. Por ello se realizó el secado del material en un horno de tratamientos térmicos de marca Naberthem a una temperatura de 60°C por un tiempo de 8 horas. En el anexo 1 se encuentra la ficha técnica del material utilizado.

FASE 2: Obtención del filamento

Se obtuvo el filamento en una extrusora mono husillo marca Filabolt a temperaturas de 190°C para PLA y PLA/MLO 5phr (5 gramos por cada 100). Para poder tener un proceso de impresión continuo sin inconvenientes de discontinuidad de deposición durante el proceso de extrusión a presión, es necesario que el material obtenido sea lo más homogéneo posible diametralmente.



Figura 22. Extrusora de filamento Filabolt. **Fuente:** Autor.

Una parte importante durante la obtención de filamento tiene que ver con la longitud del material debido a que debe ser suficiente como para que complete el volumen necesario para formar la probeta puesto que si la impresora se queda sin el material suficiente pueden ocurrir problemas al intentar cargar otro filamento.



Figura 23. Filamento extruido para ingresarlo a la impresora 3D. **Fuente:** Autor.

El ABS utilizado es un material comercial de diámetro 2,85mm, el cual viene en una presentación a manera de bobina evitando de este modo la discontinuidad en la realización de la impresión. En el anexo 2 se encuentra la ficha técnica del material utilizado.

5.1.3 Etapa C

FASE 4: Pruebas de impresión

Se realizó las pruebas de impresión con el fin de establecer los parámetros más idóneos, y también verificar que el material obtenido en la extrusora Filabolt permita un proceso continuo de impresión.

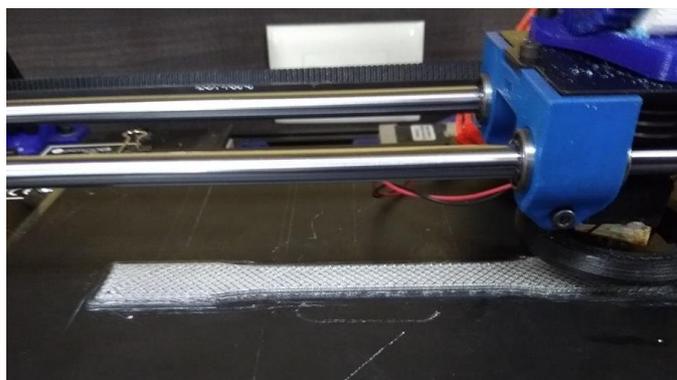


Figura 24. Pruebas de impresión. Fuente: Autor.

FASE 5: Impresión de probetas

En la fase de impresión de probetas se realizó con los tres tipos de materiales los cuales son ABS y PLA y el PLA/MLO 5phr. En la tabla 7 se encuentra las características principales del lote impreso.

Tabla 7. Características del lote impreso. Fuente: Autor.

Probeta	Material	% de Relleno	Tiempo por probeta
1 – 7	ABS	40	39 min
8 – 14	ABS	80	47 min
15 – 21	PLA	40	39 min
22 – 28	PLA	80	47 min
29 – 35	PLA/MLO 5phr	40	39 min
36 – 42	PLA/MLO 5phr	80	47 min

FASE 6: Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó en una maquina universal de ensayos marca Test Resource modelo 315 y un extensómetro de marca Epsilon modelo SN E98328. el cual tiene como función principal determinar la distancia entre dos puntos designados dentro

de la longitud del calibre de la muestra de prueba a medida que la muestra se estira. En la figura 25 se muestra el equipo utilizado para los ensayos con sus diversas partes.

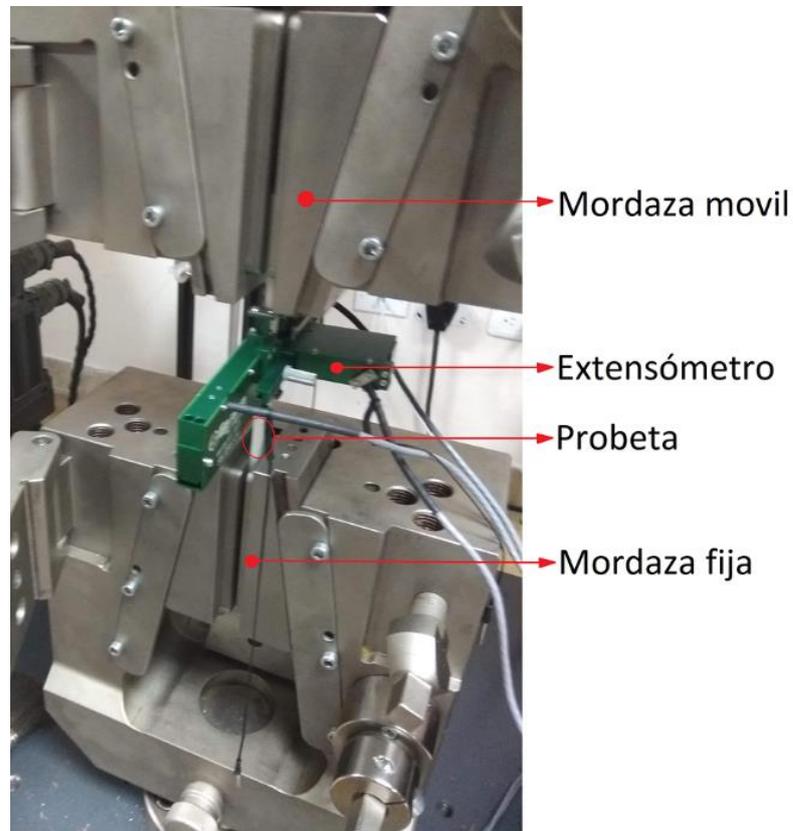


Figura 25. Máquina de ensayos de tracción. **Fuente:** Autor.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En la tabla 8 se observa los resultados del análisis de tracción realizado, donde se especifica los valores obtenidos de las propiedades como son el esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia y finalmente el porcentaje de elongación producido en las probetas. Los datos fueron extraídos del software de la máquina Test Resource.

Tabla 8. Base de datos del lote de probetas. **Fuente:** Autor.

Ensayo	Material y densidad de relleno	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Elongación %
1	ABS-40%	13,20691	1092,38	3,27566	0,84
2	ABS-40%	15,5594	1868,28	3,01975	0,83
3	ABS-40%	14,99639	2074,18	3,01975	0,72
4	ABS-40%	16,0711	1488,76	3,78748	0,84
5	ABS-40%	13,74438	1263,47	4,14576	0,80
6	ABS-40%	13,97275	1585,47	3,27566	0,68
7	ABS-40%	14,53575	3061,78	2,81502	0,67
8	ABS-80%	21,29181	2282,48	10,85063	1,23
9	ABS-80%	22,82727	2596,51	6,9096	1,18
10	ABS-80%	21,90599	2632,68	5,42532	0,98
11	ABS-80%	22,87846	1217,76	18,68151	1,38
12	ABS-80%	20,98471	1860,54	6,96078	1,13
13	ABS-80%	19,55161	2291,75	6,80724	1,15
14	ABS-80%	22,05954	2229,07	5,78359	1,19
15	PLA-40%	21,98471	2457,64	7,06315	0,854
16	PLA-40%	20,06343	2022,68	5,01586	0,892
17	PLA-40%	20,52407	2850,84	3,83867	0,720
18	PLA-40%	21,77999	2614,14	4,86231	0,830
19	PLA-40%	21,44535	2976,09	6,24423	0,832
20	PLA-40%	21,67762	2208,76	5,42532	0,856
21	PLA-40%	20,29959	2302,13	3,42921	0,832
22	PLA-80%	NA	NA	NA	NA
23	PLA-80%	27,53604	3653,27	6,6	0,98
24	PLA-80%	28,04786	2750,92	9,16162	1,02
25	PLA-80%	28,25259	2813,22	9,98063	1,00
26	PLA-80%	26,00057	2857,63	7,88206	0,91
27	PLA-80%	26,76831	2804,43	8,59861	0,95
28	PLA-80%	24,10683	1919,39478	12,33492	1,02
29	PLA/MLO 5phr-40%	12,79556	8789,6	3,83867	0,70
30	PLA/MLO 5phr-40%	NA	NA	NA	NA
31	PLA/MLO 5phr-40%	13,6893	8240,63	3,53157	0,81
32	PLA/MLO 5phr-40%	13,05147	1854,85	3,12212	0,75
33	PLA/MLO 5phr-40%	12,83117	2755,47	5,68123	0,77
34	PLA/MLO 5phr-40%	14,22477	2215,36	4,09458	0,76
35	PLA/MLO 5phr-40%	17,27205	1584,24	6,3466	0,76
36	PLA/MLO 5phr-80%	25,28402	2013,3	17,76023	1,26
37	PLA/MLO 5phr-80%	28,61115	3039,7	26,38638	1,37
38	PLA/MLO 5phr-80%	27,64201	1839,01	7,06315	1,15
39	PLA/MLO 5phr-80%	29,53215	2480,68	16,37831	1,19
40	PLA/MLO 5phr-80%	25,01615	1894,98	8,3427	1,10
41	PLA/MLO 5phr-80%	27,0754	1999,85	19,85871	1,35
42	PLA/MLO 5phr-80%	28,20141	2464,3	15,50822	1,14

En la tabla 9 se observa los valores promedios de cada propiedad obtenidos en los diversos materiales.

Tabla 9. Tabla resumen de resultados. Fuente: Autor.

Material y densidad de relleno	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Elongación (%)
ABS-40%	14,58	1776,33	3,3341	0,76
ABS-80%	21,64	2158,68	8,7740	1,17
PLA-40%	21,11	2490,32	5,1255	0,82
PLA-80%	26,78	2799,81	9,0929	0,98
PLA/MLO 5phr-40%	13,97	4240,02	4,4357	0,75
PLA/MLO 5phr-80%	27,19	3243,71	10,1677	1,23

Como se puede visualizar en la tabla 9 y la figura 26, las probetas correspondientes a una densidad de 40%, el valor más alto de esfuerzo máximo expone el PLA, esto se asume que es debido al alto grado de cristalinidad del PLA, haciendo un material más duro y quebradizo [53]. Sin embargo, la diferencia entre ABS y PLA/MLO 5phr es mínima en la cual el ABS tiene el valor más alto respecto al ABS PLA/MLO 5phr. Lo que indica que por tratarse de un porcentaje de densidad de relleno bajo, el MLO no afecta mayoritariamente en los valores de esfuerzo obtenidas.

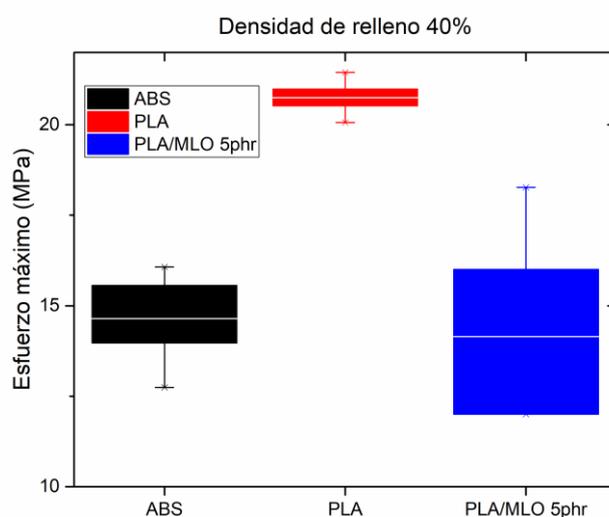


Figura 26. Valores de esfuerzo máximo con un 40% de densidad de relleno. Fuente: Autor.

En la figura 27 se observa el resultado de esfuerzo máximo, de las probetas que tienen un 80% de densidad de relleno. El material con mayor resistencia máxima a la tracción se observa que es el PLA/MLO 5phr con un valor medio de 28MPa aproximadamente, seguido con una pequeña diferencia por el PLA el mismo que tiene un valor medio de 27 MPa aproximadamente, finalmente se encuentra el ABS el cual se

encuentra con un valor medio de 22 MPa. Lo que indica que la interacción de MLO con la densidad de relleno al 80%, influye de una manera positiva, aumentando la resistencia. También se puede decir que el MLO mejora de alguna manera las propiedades del PLA estructuralmente.

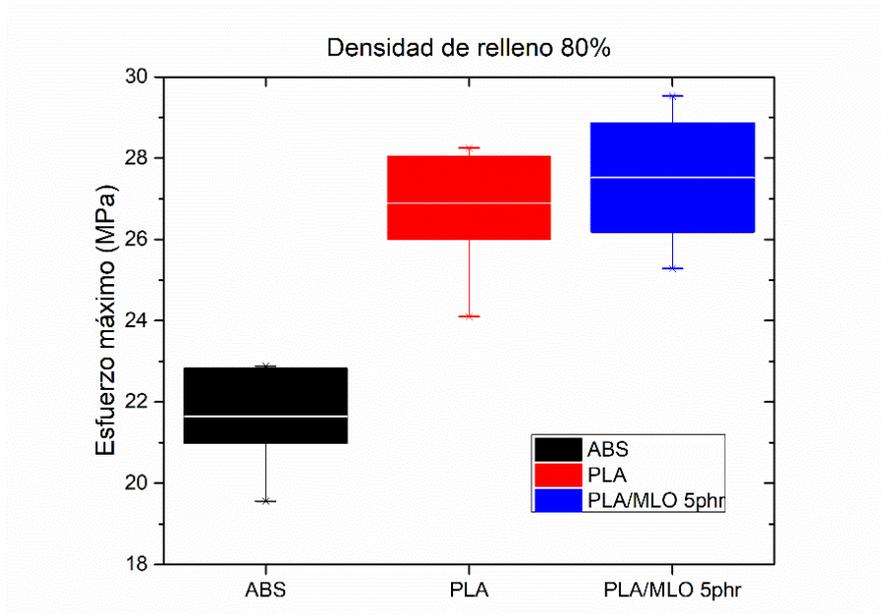


Figura 27. Valores de esfuerzo máximo con un 80% de densidad de relleno. Fuente: Autor.

En la figura 28 se encontró que la elongación producida en los materiales con una densidad de relleno del 40% no tiene una variación significativa, sin embargo, el PLA supera con una pequeña diferencia al ABS y PLA/MLO 5phr los cuales tienen un comportamiento sin mayor variabilidad.

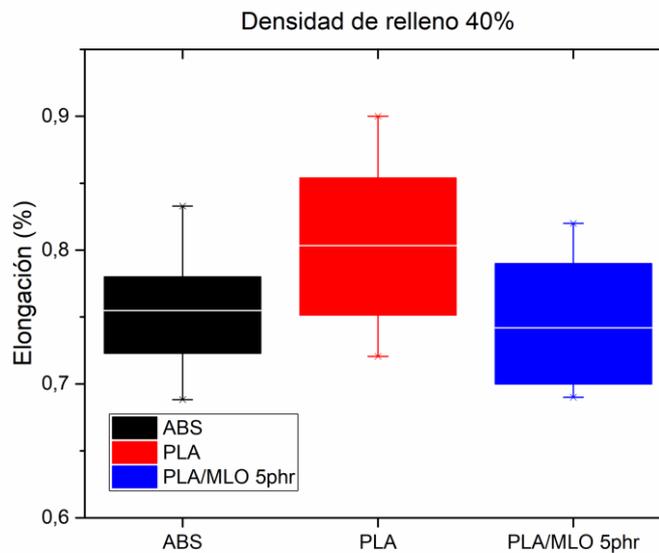


Figura 28. Valores elongación con un 40% de densidad de relleno. Fuente: Autor.

En la figura 29 se observa los resultados del análisis de elongación de los materiales en análisis con un porcentaje de relleno del 80%, en el cual se observa que el PLA/MLO 5phr tiene una elongación más alta respecto a los otros dos materiales. El PLA al 80% de relleno tiene un aumento mínimo respecto al 40% de relleno, esto se debería a la diferencia de la densidad de las probetas. Respecto al ABS se observa que se trata de un material que tiene una elongación similar al PLA/MLO 5phr.

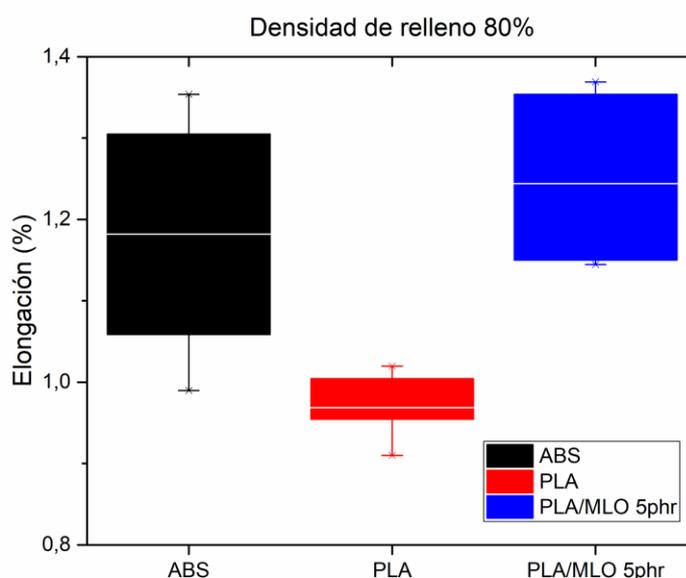


Figura 29. Valores elongación con un 80% de densidad de relleno. **Fuente:** Autor.

6.1 Análisis estadístico ANOVA.

Para determinar una diferencia de las propiedades se realizó un análisis de varianza ANOVA el cual me determinara el margen de diferencia existente con un nivel de confianza del 95% [54]. El método aplicado será el método Bonferroni el cual reparte el error de tipo I (0,05%) por igual entre todas las comparaciones [55].

Diseño de experimento:

a= Materiales utilizados ABS, PLA y PLA/MLO 5phr.

b = Densidad de relleno (40% y 80%).

(ab) = Interacción.

Variables y/o factores:

Resistencia a la tracción (MPa) y Elongación (%).

Niveles o Tratamientos:

PLA con 40% de densidad de relleno.
PLA con 80% de densidad de relleno.
ABS con 40% de densidad de relleno.
ABS con 80% de densidad de relleno.
PLA/MLO 5phr con 40% de densidad de relleno.
PLA/MLO 5phr con 80% de densidad de relleno.

Hipótesis:

Hipótesis de a:

H0: los materiales utilizados NO influyen en las propiedades mecánicas.

H1: los materiales utilizados SI influyen en las propiedades mecánicas.

Hipótesis de b:

H0: los porcentajes de relleno NO son variantes entre los materiales.

H1: los porcentajes de relleno SI son variantes entre los tres materiales.

Hipótesis de (ab):

H0: NO existe una interacción directa entre el porcentaje de relleno y el material utilizado.

H1: SI existe una interacción directa entre el porcentaje de relleno y el material utilizado.

6.1.1 Análisis estadístico ANOVA para el esfuerzo máximo.

En la tabla 10 se resume los datos estadísticos, se dividió en dos factores donde el primero es el material a analizar PLA y el PLA/MLO 5phr y el segundo factor es la densidad de relleno la cual tiene dos niveles 40% y 80%. Se evaluará la interacción entre los dos materiales y sus niveles de densidad para poder determinar la diferencia existente en el esfuerzo máximo.

Tabla 10. Resumen estadístico para el esfuerzo del PLA y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

FACTOR A (MATERIAL)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
PLA	14	23,57	3,70137	0,98923	13,70011	
PLA/MLO 5phr	14	20,89	5,99572	1,60242	35,94862	
FACTOR B (DENSIDAD)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
40%	14	26,33	2,78	0,74485	7,76726	
80%	14	18,13	3,08	0,82367	9,4981	
INTERACCIÓN						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
PLA	40%	7	20,25	1,369	0,517	1,87
	80%	7	26,89	1,448	0,547	2,09
PLA/MLO	40%	7	16,01	2,866	1,083	8,21
	5phr	80%	7	25,78	3,743	14,01

En la tabla 11, se analiza la varianza en el esfuerzo máximo a la tracción en dos componentes que son el material utilizado y la densidad de relleno. Se observa que los materiales en análisis influyen en un 7% en la varianza del esfuerzo a tracción, mientras tanto que la densidad de relleno (40 y 80%), influye en un 67% en la varianza del valor de esfuerzo a tracción, finalmente la interacción del material con la densidad de relleno influye en un 2%.

Tabla 11. Tabla ANOVA para el esfuerzo entre el PLA y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Material	1	50,13	50,13	7,65	0,0107
% de relleno	1	471,11	471,11	71,93	1,10 e-8
Interacción	1	17,13	17,13	2,61	0,1188
Error	24	157,18	6,54		
Corrección total	27	695,56			

Se aplicó el método Bonferroni para disminuir el error en la comparación múltiple realizada, para ello el error del 5% es necesario ser recalculado para evaluar la significancia de cada factor considerando su valor P obtenido. En la tabla 12 se encuentra realizada la corrección Bonferroni para los valores de P, en donde al comparar el valor P obtenido con

los valores del modelo Bonferroni, se concluye que existe una diferencia significativa en la varianza de los factores en análisis (porcentaje de relleno, y el material utilizado) debido a que tienen valores de P muy pequeños. Por otro lado, en la interacción de los materiales con sus densidades, estadísticamente la tabla Bonferroni indica una diferencia no significativa.

Tabla 12. Corrección Bonferroni esfuerzo PLA y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

Carácter	Valor P	Bonferroni (0,05)	Resultado
% de relleno	1,10 e-8	0,0169524	Acepto H1
Material	0,01073	0,0253206	Acepto H1
Interacción	0,1188	0,05	Acepto H0

De manera similar se realiza el análisis de varianza para el esfuerzo máximo a los materiales ABS y PLA de igual manera con las dos densidades de relleno 40% y 80%. En la tabla 13 se encuentra los datos estadísticos para realizar la comparación múltiple.

Tabla 13. Resumen estadístico para el esfuerzo del PLA y ABS. **Fuente:** Autor.

FACTOR A (MATERIAL)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
PLA	14	17,899	4,12808	1,103	17,041	
ABS	14	23,573	3,70137	0,989	13,700	
FACTOR B (DENSIDAD)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
40%	14	17,204	3,493	0,9335	12,201	
80%	14	24,267	3,001	0,8022	9,011	
INTERACCIÓN						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
PLA	40%	7	14,155	1,693	0,64	2,86
	80%	7	21,64	1,162	0,43	1,35
ABS	40%	7	20,25	1,369	0,51	1,87
	80%	7	26,89	1,448	0,54	2,09

En la tabla 14, se analiza la varianza en el esfuerzo máximo a la tracción en dos componentes que son el material utilizado y la densidad de relleno. Se observa que el material influye en un 36% en la varianza del esfuerzo máximo a tracción, mientras tanto

que la densidad de relleno influye en un 55% en la varianza del valor de esfuerzo máximo a la tracción, finalmente la interacción del material con la densidad de relleno influye en un 0,2%.

Tabla 14. Tabla ANOVA para el esfuerzo entre el PLA y ABS. **Fuente:** Autor.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Material	1	225,36	225,36	110,059	1,91 e-10
% de Relleno	1	349,23	349,23	170,55	2,12 e -10
Interacción	1	1,259	1,25	0,6152	0,4405
Error	24	49,144	2,047		
Corrección total	27	625			

Se aplicó el método Bonferroni para analizar la diferencia existente entre el ABS y el PLA en esfuerzo máximo a la tracción. En la tabla 15 se encuentra realizada la corrección Bonferroni para los valores de P, en donde al comparar el valor P obtenido con los valores del modelo Bonferroni se puede decir que existe una diferencia significativa en la varianza de los datos en el porcentaje de relleno, y el material utilizado debido a que tienen valores de P muy pequeños. Por otro lado, en la interacción de los materiales con sus densidades, estadísticamente la tabla Bonferroni indica una diferencia no significativa.

Tabla 15. Corrección Bonferroni esfuerzo PLA y ABS. **Fuente:** Autor.

Carácter	Valor P	Bonferroni (0,05)	Resultado
Material	1,91 e-10	0,0169524	Acepto H1
% de relleno	2,12 e -10	0,0253206	Acepto H1
Interacción	0,4405	0,05	Acepto H0

De manera similar se realiza el análisis de varianza para el esfuerzo máximo a los materiales ABS y PLA/MLO 5phr de igual manera con las dos densidades de relleno 40% y 80%. Es indispensable la comparación debido a que se comparará a un material nuevo como lo es el PLA/MLO 5phr con un material comercial el cual es el ABS, de modo que se pueda diferenciar las propiedades entre estos dos para proyectos futuros.

En la tabla 16 se encuentra los datos estadísticos para realizar la comparación múltiple.

Tabla 16. Resumen estadístico para el esfuerzo del ABS y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

FACTOR A (MATERIAL)						
		<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>
ABS		14	17,899	4,12808	1,103	17,041
PLA/MLO 5phr		14	20,896	5,99572	1,602	35,948
FACTOR B (DENSIDAD)						
		<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>
40%		14	14,083	2,458	0,657	6,043
80%		14	23,712	3,420	0,914	11,701
INTERACCIÓN						
		<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>
PLA/MLO	40%	7	14,155	1,693	0,64	2,86
5phr	80%	7	21,64	1,162	0,43	1,35
ABS	40%	7	16,01	2,865	1,083	8,21
	80%	7	25,78	3,743	1,414	14,01

En la tabla 17, se analiza la varianza en el esfuerzo máximo a la tracción en dos componentes que son el material utilizado y la densidad de relleno. Se observa que el material influye en un 8% en la varianza del esfuerzo máximo a tracción, mientras tanto que la densidad de relleno influye en un 69% en la varianza del valor de esfuerzo máximo a la tracción, finalmente la interacción del material con la densidad de relleno influye en un 1%.

Tabla 17. Tabla ANOVA para el esfuerzo entre el ABS y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Material	1	62,91	62,91	9,51	0,00507
% de Relleno	1	521,09	521,09	78,82	4,75 e -9
Interacción	1	9,10	9,10	1,37	0,252
Error	24	158,66	6,61		
Corrección total	27	751,78			

Se aplicó el método Bonferroni para analizar la diferencia existente entre el ABS y el PLA/MLO 5phr en esfuerzo máximo a la tracción. En la tabla 18 se encuentra realizada la corrección Bonferroni para los valores de P, en donde al comparar el valor P obtenido con los valores del modelo Bonferroni se puede decir que existe una diferencia significativa en

la varianza de los datos en el porcentaje de relleno, y el material utilizado debido a que tienen valores de P muy pequeños. Por otro lado, en la interacción de los materiales con sus densidades, estadísticamente la tabla Bonferroni indica una diferencia no significativa.

Tabla 18. Corrección Bonferroni esfuerzo ABS y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

Carácter	Valor P	Bonferroni (0,05)	Resultado
% de relleno	4,74 e -9	0,0169524	Acepto H1
Material	0,00507	0,0253206	Acepto H1
Interacción	0,252	0,05	Acepto H0

6.1.2 Análisis estadístico ANOVA para la elongación.

En la tabla 19, se resume los datos estadísticos, se dividió en dos factores donde el primero es el material a analizar PLA y el PLA/MLO 5phr y el segundo factor es la densidad de relleno la cual tiene dos niveles 40% y 80%. Se evaluó la interacción entre los dos materiales y sus niveles de densidad para poder determinar la diferencia existente en la elongación.

Tabla 19. Resumen estadístico para la elongación del PLA y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

FACTOR A (MATERIAL)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
PLA	14	0,88718	0,15318	0,04094	0,02346	
PLA/MLO 5phr	14	0,8428	0,43511	0,11629	0,18932	
FACTOR B (DENSIDAD)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
40%	14	0,68688	0,30838	0,08242	0,0951	
80%	14	1,0431	0,22454	0,06001	0,05042	
INTERACCIÓN						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
PLA	40%	7	0,82412	0,10747	0,04062	0,01155
	80%	7	0,95024	0,17324	0,06548	0,03001
PLA/MLO 5phr	40%	7	0,54964	0,38801	0,14665	0,15055
	80%	7	1,13596	0,24313	0,09189	0,05911

En la tabla 20, se analiza la varianza en la elongación en dos componentes que son el material utilizado y la densidad de relleno. Se observa que el material influye en un 1% en la varianza de la elongación, mientras tanto que la densidad de relleno influye en un 30% en la varianza del valor de elongación, finalmente la interacción del material con la densidad de relleno influye en un 13,33%.

Tabla 20. Tabla ANOVA para la elongación entre el PLA y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Material	1	0,01379	0,01379	0,21953	0,64362
% de relleno	1	0,88824	0,88824	14,14283	0,0009623
Interacción	1	0,37062	0,37062	5,90116	0,02299
Error	24	1,50733	0,06281		
Corrección total	27	2,77998			

En la tabla 21 se encuentra realizada la corrección Bonferroni para los valores de P, en donde al comparar el valor P obtenido con los valores del modelo Bonferroni, se concluye que existe una diferencia significativa en la varianza de los factores en análisis (porcentaje de relleno, y el material utilizado) debido a que tienen valores de P muy pequeños. Por otro lado, en la interacción de los materiales con sus densidades, estadísticamente la tabla Bonferroni indica una diferencia no significativa.

Tabla 21. Corrección Bonferroni elongación PLA y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

Carácter	Valor P	Bonferroni (0,05)	Resultado
% de relleno	0,0009623	0,0169524	Acepto H1
Interacción	0,02299	0,0253206	Acepto H1
Material	0,64362	0,05	Acepto H0

De manera similar se realiza el análisis de varianza para la elongación a los materiales ABS y PLA de igual manera con las dos densidades de relleno 40% y 80%. En la tabla 22 se encuentra los datos estadísticos para realizar la comparación múltiple.

Tabla 22. Resumen estadístico para la elongación del PLA y ABS. Fuente: Autor.

FACTOR A (MATERIAL)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
ABS	14	0,9656	0,309	0,082	0,0956	
PLA	14	0,905	0,151	0,040	0,0228	
FACTOR B (DENSIDAD)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
40%	14	0,842	0,161	0,043	0,0261	
80%	14	1,028	0,275	0,073	0,0756	
INTERACCIÓN						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
ABS	40%	7	0,86	0,21	0,079	0,044
	80%	7	1,07	0,37	0,139	0,137
PLA	40%	7	0,824	0,107	0,04	0,011
	80%	7	0,98	0,15	0,05	0,022

En la tabla 23, se analiza la varianza en la elongación en dos componentes que son el material utilizado y la densidad de relleno. Se observa que el material influye en un 2% en la varianza de la elongación, mientras tanto que la densidad de relleno influye en un 15% en la varianza del valor de elongación, finalmente la interacción del material con la densidad de relleno influye en un 0,2%.

Tabla 23. Tabla ANOVA para la elongación entre el PLA y ABS. Fuente: Autor.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Material	1	0,025	0,025	0,476	0,496
% de relleno	1	0,241	0,24	4,48	0,044
Interacción	1	0,003	0,003	0,07	0,787
Error	24	1,293	0,05		
Corrección total	27	1,56			

En la tabla 24 se encuentra realizada la corrección Bonferroni para los valores de P, en donde al comparar el valor P obtenido con los valores del modelo Bonferroni, se concluye que no existe una diferencia significativa en la varianza de los factores en análisis (porcentaje de relleno, y el material utilizado) y además que la interacción de los materiales

con sus densidades indica una diferencia no significativa debido a que los valores de P son superiores a los límites dados en el método Bonferroni.

Tabla 24. Corrección Bonferroni elongación PLA y ABS **Fuente:** Autor.

Carácter	Valor P	Bonferroni (0,05)	Resultado
% de relleno	0,044	0,0169524	Acepto H0
Material	0,496	0,0253206	Acepto H0
Interacción	0,787	0,05	Acepto H0

En la tabla 25, se resume los datos estadísticos, se dividió en dos factores donde el primero es el material a analizar ABS y el PLA/MLO 5phr y el segundo factor es la densidad de relleno la cual tiene dos niveles 40% y 80%. Se evaluó la interacción entre los dos materiales y sus niveles de densidad para poder determinar la diferencia existente en la elongación.

Tabla 25. Resumen estadístico para la elongación del ABS y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

FACTOR A (MATERIAL)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
ABS	14	0,88718	0,15318	0,04094	0,02346	
PLA/MLO 5phr	14	0,97743	0,33636	0,0899	0,11314	
FACTOR B (DENSIDAD)						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
40%	14	0,79011	0,25143	0,0672	0,063	
80%	14	1,07172	0,18662	0,0498	0,034	
INTERACCIÓN						
	<u>Recuento</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación estándar</u>	<u>Error estándar</u>	<u>Varianza</u>	
ABS	40%	7	0,86085	0,21063	0,07961	0,04436
	80%	7	0,90794	0,06375	0,02409	0,00406
PLA/MLO	40%	7	0,71937	0,28449	0,10753	0,08093
5phr	80%	7	1,23549	0,09388	0,03548	0,00881

En la tabla 26, se analiza la varianza en la elongación en dos componentes que son el material utilizado y la densidad de relleno. Se observa que el material influye en un 3% en la varianza de la elongación, mientras tanto que la densidad de relleno influye en un

30% en la varianza del valor de elongación, finalmente la interacción del material con la densidad de relleno influye en un 2%.

Tabla 26. Tabla ANOVA para la elongación entre el ABS y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Material	1	0,06059	0,06059	1,753	0,197
% de relleno	1	0,5551	0,5551	16,069	5,15 e-04
Interacción	1	0,38497	0,38497	11,144	0,00274
Error	24	0,82905	0,03454		
Corrección total	27	1,8297			

En la tabla 27 se encuentra realizada la corrección Bonferroni para los valores de P, en donde al comparar el valor P obtenido con los valores del modelo Bonferroni, se concluye que existe una diferencia significativa en la varianza de los factores en análisis (porcentaje de relleno, y el material utilizado) debido a que tienen valores de P muy pequeños. Por otro lado, en la interacción de los materiales con sus densidades, estadísticamente la tabla Bonferroni indica una diferencia no significativa.

Tabla 27. Corrección Bonferroni elongación ABS y PLA/MLO 5phr. **Fuente:** Autor.

Carácter	Valor P	Bonferroni (0,05)	Resultado
% de relleno	5,15 e-04	0,0169524	Acepto H1
Interacción	0,00274	0,0253206	Acepto H1
Material	0,197	0,05	Acepto H0

En resumen, en la tabla 28 se indica todos los resultados obtenidos por el análisis ANOVA donde se especifica la significancia entre los materiales analizados y sus densidades.

Se puede observar que con respecto al esfuerzo se tiene un comportamiento similar en todas las comparaciones, teniendo como carácter predominante la densidad de relleno que al aumentar su valor aumenta el esfuerzo máximo, por otro lado, se tiene que el material es influyente en el esfuerzo máximo, pero en un porcentaje menor, finalmente en la interacción entre el material y la densidad de relleno es insignificante en todos los casos.

Para la elongación se tiene que la influencia del material en todos los casos no es significativa, mientras que la densidad de relleno y la interacción de los dos caracteres influye solamente con la presencia del PLA/MLO 5phr debido al aporte que genera el plastificante a la estructura del material.

Tabla 28. Resumen de análisis ANOVA. Fuente: Autor.

Esfuerzo			
Carácter	PLA - PLA/MLO 5phr	PLA - ABS	ABS - PLA/MLO 5phr
% de relleno	Significante (67%)	Significante (55%)	Significante (69%)
Material	Significante (7%)	Significante (36%)	Significante (8%)
Interacción	No significativa (2%)	No significativa (0,2%)	No significativa (1%)
Elongación			
Carácter	PLA - PLA/MLO 5phr	PLA - ABS	ABS - PLA/MLO 5phr
% de relleno	Significante (30%)	No significativa (15%)	Significante (30%)
Material	No significativa (1%)	No significativa (2%)	No significativa (3%)
Interacción	Significante (13,33%)	No significativa (0,2%)	Significante (21%)

6.2 Análisis de las curvas esfuerzo deformación

A partir de la curva que se observa a continuación (figura 30) del ensayo de tracción, observamos que la resistencia máxima a la tracción del PLA respecto a los otros dos materiales comparados es mayor, confirmando lo analizado en las tablas ANOVA anteriormente realizadas. Para el análisis de elongación, se realizó los cálculos con referencia al esfuerzo máximo a la tracción y no al esfuerzo último, debido que al tratarse de probetas impresas que no forman un elemento sólido dependerán de la unión de los filamentos, las probetas fracasan debido a que cada filamento del que está constituido la probeta se separa de la probeta y se rompe. Una vez explicado cómo se realizó el cálculo de la elongación y que puntos fueron tomados como referencia, se puede indicar que la diferencia en la elongación entre los tres materiales a una densidad de relleno de 40% no es significativa ya que oscilan entre 0,68% para el ABS y el PLA/MLO 5phr, y un 0,82% para el PLA.

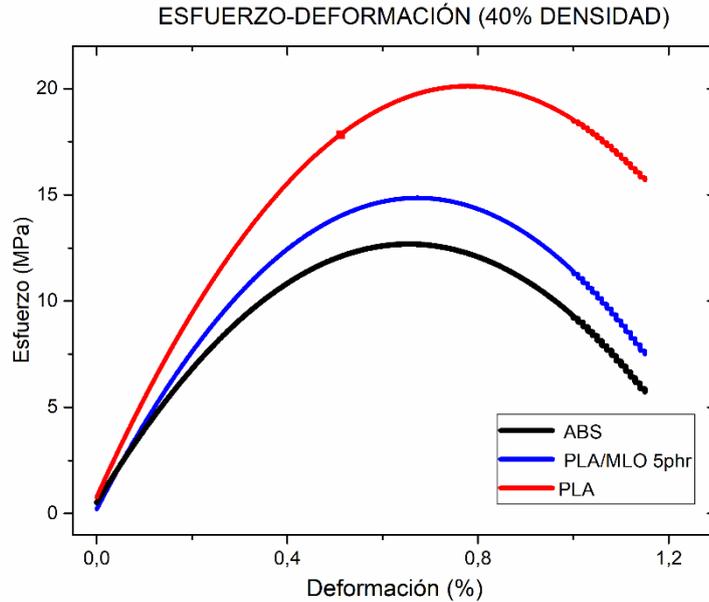


Figura 30. Curvas esfuerzo deformación del ABS, PLA y PLA/MLO 5phr al 40% de densidad. **Fuente:** Autor.

De la curva que se observan a continuación (figura 31) de los ensayos de tracción, observamos que la resistencia máxima a la tracción de dos materiales el PLA y el PLA/MLO 5phr es mayor, confirmando lo analizado en las tablas ANOVA anteriormente realizadas. Se puede indicar que la diferencia en la elongación entre los tres materiales a una densidad de relleno de 80% es diferente para todos los casos donde el PLA/MLO 5phr tiene un valor alto cercano al 1,25%, seguido del ABS con un valor aproximado de 1,15% y finalmente se encuentra el PLA con un porcentaje de elongación de 1%.

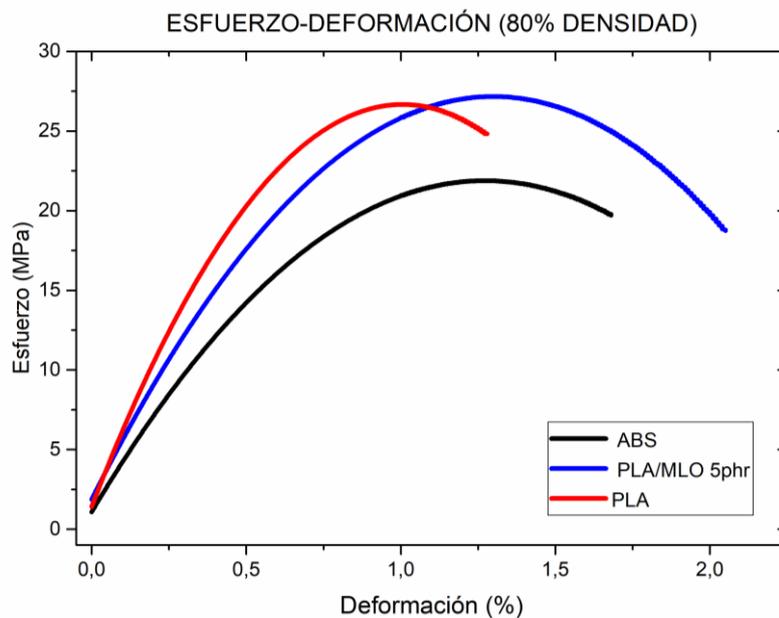


Figura 31. Curvas esfuerzo deformación del ABS, PLA y PLA/MLO 5phr al 80% de densidad. **Fuente:** Autor.

CONCLUSIONES

En base a los objetivos específicos planteados al inicio del proyecto se puede concluir lo siguiente:

- **O.E.1.-** Se realizó la impresión de las probetas donde el principal inconveniente se presenta con el PLA y el PLA/MLO 5phr, debido al diámetro de filamento (2,5mm) el cual es inferior al admitido por la impresora, para solucionar este inconveniente se cambió el valor del flujo del material a 103%, de modo que la aplicación del material no genere discontinuidades en el elemento impreso. Para el ABS al ser un material comercial no existe este inconveniente por lo que el flujo utilizado es de 100%.
- La temperatura de impresión se encuentra para el ABS en 240°C (recomendada por el fabricante) y para el PLA y PLA/MLO 5phr es de 215°C, la cual se encuentra en el rango de fusión del material, y además se adhiere de una mejor manera a la superficie de impresión que se encuentra a 50°C para los dos casos.
- La velocidad de impresión fue de 60mm/s recomendada por el fabricante para una buena calidad de impresión.
- **O.E.2.-** Estadísticamente no se tiene variación de la elongación con la presencia del plastificante MLO en el caso de la densidad de relleno del 40%, lo que es corroborado por la figura 28 y la curva esfuerzo deformación donde se identifica que la elongación oscila entre el 0,68% y el 0,82%.
- Por otro lado, en el caso de la elongación con la densidad del 80% estadísticamente no existe una variación, sin embargo, se debe considerar que los valores de elongación son porcentajes muy pequeños. Para este caso es notoria la variación de la elongación entre materiales tanto en el diagrama de cajas de la figura 29 y en la curva esfuerzo deformación de la figura 31 donde es evidente que el PLA aumenta su elongación debido a la presencia del MLO y a la densidad de relleno, mientras tanto el PLA no aumenta en gran proporción su elongación respecto a las probetas con un 40% de densidad. El ABS tiene un comportamiento muy parecido al PLA/MLO 5phr sin embargo se encuentra con un valor por debajo del material mencionado.
- Estadísticamente no es significativa la comparación en elongación del PLA y el ABS debido a los valores bajos que diferencia a uno de otro. Sin embargo,

mecánicamente la diferencia es notoria en las gráficas 30 y 31, esta diferenciación es un punto de partida para el diseño de elementos impresos sometidos a cargas de tracción.

- **O.E.3.-** Se determinó que el esfuerzo a tracción es afectado directamente por la densidad de relleno, en todos los casos analizados se evidencia que existe un alto grado de significancia del porcentaje de relleno en el esfuerzo máximo. Entre el PLA y PLA/MLO 5phr existe un 67% de significancia del porcentaje de relleno en el esfuerzo máximo, por otro lado, en la comparación del PLA/MLO 5phr con el ABS existe una significancia del 69%, mientras que la significancia en la comparación entre el PLA y el ABS tiene un valor del 55%. Indicando que a mayor densidad de las probetas impresas la resistencia máxima aumenta, ya que obtenemos probetas con más cantidad de relleno lo que es lo mismo menor porosidad, haciendo que los puntos críticos de rotura disminuyan.

RECOMENDACIONES

- Obtener un material lo más homogéneo diametralmente posible para evitar obstrucciones que impidan continuar con el proceso normal de impresión.
- Tomar en cuenta que el proceso de impresión es un proceso continuo por lo que es necesario que la longitud del material a imprimir sea el suficiente para culminar todas las trayectorias del elemento, en el caso de tener que completar la impresión con otro tramo de material tener en cuenta que se pueden provocar obstrucciones o averías en la impresora.
- Para tener una adherencia correcta del objeto a imprimir se recomienda la utilización de superficies para impresión 3D las cuales deben ser pegadas en la cama de impresión adhiriendo a las piezas de mejor manera que una laca o pegamento.
- En el ensayo a tracción es indispensable contar con un extensómetro el cual aportará una medida con mayor resolución, de tal manera que los resultados no se vean afectados.

TRABAJOS FUTUROS

- Diseñar boquillas de la extrusora de mono husillo Filabolt que permita la obtención de materiales del diámetro necesario para impresión tomando en cuenta las propiedades del material a obtener.
- Desarrollar un análisis de ensayo de flexión, con diferentes densidades de impresión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. A. Perdomo, «Plásticos y medio ambiente», *Rev. Iberoam.*, vol. 3, pp. 1–13, 2002.
- [2] L. Jiang y J. Zhang, «Biodegradable and biobased polymers», en *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)*, Elsevier, 2017, pp. 127–143.
- [3] C. Cobos, «Determinación de la posibilidad de la implementación de un nanocompuesto de PLA/MWCNTs para impresión 3D LOW COST FFF», *Máster Univ. Politécnica Valencia, Valencia Esp.*, 2014.
- [4] M. Osejos y J. Vinicio, «Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes», *Master's Thesis*, Quito, 2016., 2016.
- [5] R. Nasrin *et al.*, «Preparation of Chitin-PLA laminated composite for implantable application», *Bioact. Mater.*, vol. 2, n.º 4, pp. 199–207, 2017.
- [6] X. Zhang, M. Espiritu, A. Bilyk, y L. Kurniawan, «Morphological behaviour of poly (lactic acid) during hydrolytic degradation», *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, n.º 10, pp. 1964–1970, 2008.
- [7] J. M. Ferri, D. García-García, L. Sánchez-Nacher, O. Fenollar, y R. Balart, «The effect of maleinized linseed oil (MLO) on mechanical performance of poly (lactic acid)-thermoplastic starch (PLA-TPS) blends», *Carbohydr. Polym.*, vol. 147, pp. 60–68, 2016.
- [8] H. Wang y Q. Zhou, «Evaluation and failure analysis of linseed oil encapsulated self-healing anticorrosive coating», *Prog. Org. Coat.*, vol. 118, pp. 108–115, 2018.
- [9] A. E. Herrera Ordoñez, «Influencia del aceite de linaza maleinizado (MLO) en la reología del polímero ácido poliláctico (PLA) para aplicaciones de impresión 3D.», *B.S. thesis*, 2018.
- [10] G. J. Zañartu Apará, «Caracterización de propiedades mecánicas de material particulado consolidado a través de un sistema de prototipado rápido experimental», 2009.
- [11] I. D. M. Group, «El mercado mundial de impresoras 3D crece un 19% | En cifras», *IT Reseller*, 06-abr-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.itreseller.es/en-cifras/2016/04/el-mercado-mundial-de-impresoras-3d-crece-un-19>. [Accedido: 10-nov-2018].
- [12] M. Peña, J. Rodríguez, y D. Restrepo, «Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de Manufactura aditiva FDM», en *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 2016.
- [13] J. Suwanprateeb, «Improvement in mechanical properties of three-dimensional printing parts made from natural polymers reinforced by acrylate resin for biomedical applications: a double infiltration approach», *Polym. Int.*, vol. 55, n.º 1, pp. 57–62, 2006.
- [14] I. P. Aparisi, «Diseño mediante elementos finitos de componentes estructurales de un cuadricóptero para impresión 3D», *PhD Thesis*, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2016.
- [15] S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, y P. K. Wright, «Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, n.º 4, pp. 248–257, 2002.
- [16] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, y J. Zhao, «Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS», *Materials*, vol. 8, n.º 9, pp. 5834–5846, 2015.
- [17] S.-J. Lee *et al.*, «3D printing nano conductive multi-walled carbon nanotube scaffolds for nerve regeneration», *J. Neural Eng.*, vol. 15, n.º 1, p. 016018, 2018.
- [18] A. Liu *et al.*, «3D printing surgical implants at the clinic: a experimental study on anterior cruciate ligament reconstruction», *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 21704, 2016.
- [19] G. Ordoñez, «La contribución al emprendimiento ecuatoriano de una empresa de tecnología 3D», *Rev. Negocios PYMES*, vol. 3, n.º 7, pp. 35–46, 2017.
- [20] R. Jones *et al.*, «RepRap—the replicating rapid prototyper», *Robotica*, vol. 29, n.º 1, pp. 177–191, 2011.

- [21] W. P. C. Guamantario, «Influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo coste», 2016.
- [22] H. Lipson y M. Kurman, «La revolución de la impresión 3D; el presente y el futuro de una máquina que puede crear (casi) cualquier cosa». Anaya Multimedia (GA), 2015.
- [23] C. Fonda, «Guía Práctica para tu primera impresión 3D», Trieste Italy, 2014.
- [24] «Build A RepRap - RepRap». [En línea]. Disponible en: https://reprap.org/wiki/Build_A_RepRap. [Accedido: 26-dic-2018].
- [25] J. de Ciurana, L. Serenó, y É. Vallès, «Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture», *Procedia Cirp*, vol. 5, pp. 152–157, 2013.
- [26] «Impresoras 3D El Futuro Hoy». [En línea]. Disponible en: <http://pice-software.com/DetalleBlog.aspx?b=%2018>. [Accedido: 12-nov-2018].
- [27] B. R. Raulino, «Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição)», 2017.
- [28] C. E. Romero Barreno y G. O. Vaca Morales, «Construcción de una impresora 3D para la elaboración de objetos plásticos utilizando el método de modelado por deposición fundida (MDF)», B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2015.
- [29] Ñ. Ñauta, A. Eugenio, y M. R. Vergara Idrovo, «Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión en 3D», Master's Thesis, 2017.
- [30] «BCN3D Technologies», *BCN3D Technologies*. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn3dtechnologies.com/es/>. [Accedido: 08-ene-2019].
- [31] «5 trucos para aborrrar en impresión 3D», *FpvMax*, 14-abr-2017. [En línea]. Disponible en: <http://fpvmax.com/2017/04/14/impresion-3d-barata/>. [Accedido: 17-nov-2018].
- [32] B. Martí Rodríguez, «Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM», B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [33] «Guía de configuración de los parámetros de Slic3r - Impresoras 3D», *Imprimalia 3D*. [En línea]. Disponible en: <http://imprimalia3d.com/recursosimpresion3d/gu-configuraci-n-par-metros-slic3r>. [Accedido: 01-dic-2018].
- [34] «La importancia del relleno en la impresión 3D», *Trimaker*, 30-nov-2017. [En línea]. Disponible en: <https://trimaker.com/el-relleno-en-impresion-3d-porcentaje-entramado-grosor-velocidad/>. [Accedido: 01-dic-2018].
- [35] C. Macas y K. Pilco, «Construcción de un modelo de fundición mediante la utilización de tecnología de impresión 3D.», Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, 2016.
- [36] «Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS): Descripción, propiedades y aplicaciones | QuimiNet.com». [En línea]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm>. [Accedido: 17-nov-2018].
- [37] K. Pielichowski y J. Njuguna, «Thermal degradation of polymeric materials». iSmithers Rapra Publishing, 2005.
- [38] H. Lipson y M. Kurman, «Fabricated: The new world of 3D printing». John Wiley & Sons, 2013.
- [39] «Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)». [En línea]. Disponible en: [/cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs](http://cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs). [Accedido: 17-nov-2018].
- [40] L. Serna y F. Albán, «Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones», *Ing. Compet.*, vol. 5, n.º 1, pp. 16–26, 2011.
- [41] R. A. Auras, L.-T. Lim, S. E. Selke, y H. Tsuji, «Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications», vol. 10. John Wiley & Sons, 2011.
- [42] A. Carbonell-Verdu, D. Garcia-Garcia, F. Dominici, L. Torre, L. Sanchez-Nacher, y R. Balart, «Pla films with improved flexibility properties by using maleinized cottonseed oil», *Eur. Polym. J.*, vol. 91, pp. 248–259, 2017.

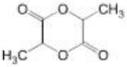
- [43] Jairo Carrero, «*Establecimiento de un procedimiento para calcular la incertidumbre en ensayos de tracción en barras corrugadas para refuerzo de concreto*», Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, 2014.
- [44] B. Ferdinand, «*Mecánica de materiales 5ª edición*». México, Editorial McGraw-Hill, 2010.
- [45] D. R. Askeland, P. P. Fulay, y W. J. Wright, «*Ciencia e Ingeniería de los Materiales*». Cengage learning, 2017.
- [46] J. C. del Caño Sánchez, «*Apuntes para una breve introducción a la Resistencia de Materiales y temas relacionados*», 2012.
- [47] M. Cervera Ruiz y E. I. Blanco Díaz, «*Mecánica de estructuras*». Edicions UPC, 2002.
- [48] J. Ruiz y E. B. Díaz, «*Resistencia de Materiales*», 10-feb-2015. [En línea]. Disponible en: <https://prezi.com/lbkh8rpjxqrr/concepto-de-torsion/>. [Accedido: 17-feb-2019].
- [49] A. S. Jaime, B. S. Cinthia, C. A. Omar, H. R. L. Gisell, y O. C. I. Marlene, «*Mecánica de materiales*», 1988.
- [50] A. Cramb, *Making, «shaping and treating of steel: casting*». Assn of Iron & Steel Engineers, 2003.
- [51] «Resistencia a la tracción (TS)», *Manufacturing terms*. [En línea]. Disponible en: [https://www.manufacturingterms.com/Spanish/Tensile-strength-\(TS\).html](https://www.manufacturingterms.com/Spanish/Tensile-strength-(TS).html). [Accedido: 27-dic-2018].
- [52] Internacional, A.S.T.M. «*ASTM D638-02 Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic*». Amerca Society for Testing and Material, Philadelphia, 2002.
- [53] J. M. Ferri, D. Garcia-Garcia, N. Montanes, O. Fenollar, y R. Balart, «*The effect of maleinized linseed oil as biobased plasticizer in poly (lactic acid)-based formulations*», *Polym. Int.*, vol. 66, n.º 6, pp. 882–891, 2017.
- [54] R. E. Walpole, R. H. Myers, y S. L. Myers, «*Probabilidad y estadística para ingenieros*». Pearson Educación, 1999.
- [55] J. Fallas, «Análisis de varianza», 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012.pdf. [Accedido: 18-feb-2019].

ANEXOS

Anexo 1

Información relevante del PLA.

PLA poly(lactic acid)

PARAMETER	UNIT	VALUE	REFERENCES
GENERAL			
Common name	-	poly(lactic acid)	
CAS name	-	poly[oxy(1-methyl-2-oxo-1,2-ethanediyl)]; 1,4-dioxane-2,5-dione, 3,6-dimethyl-, homopolymer	
Acronym	-	PLA	
CAS number	-	51063-13-9, 26680-10-4, 34346-01-5	
Formula			
HISTORY			
Person to discover	-	Carother, W H; Dourough, G L; Van Natta F J. Filachione, E M	Carother, W H; Dourough, G L; Van Natta F J, J. Am. Chem. Soc., 54, 761-72, 1932; Filachione, E M, US Patent 2,396,994, USA, Mar. 19, 1946.
Date	-	1932, 1946	
Details	-	first synthesis by DuPont scientists; lactic acid was polymerized in the presence of p-toluenesulfonic acid	
SYNTHESIS			
Monomer(s) structure	-		
Monomer(s) CAS number(s)	-	4511-42-6	
Monomer(s) molecular weight(s)	dalton, g/mol, amu	144.13	
Monomer ratio	-	100% or less (in blends)	
Concentration of L-lactide	%	94-98	
Formulation example	-	lactic acid and tin catalyst	
Method of synthesis	-	lactic acid is heated at 150°C to obtain oligomeric PLA (polymerization degree: 1-8). Oligomers are heated at 180°C under vacuum for 5 hours to give PLA having molecular weight of 100,000	Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005.
Temperature of polymerization	°C	150-180	
Time of polymerization	h	5	
Pressure of polymerization	Pa	vacuum	
Catalyst	-	tin	
Number average molecular weight, M _n	dalton, g/mol, amu	74,000-660,000	
Mass average molecular weight, M _w	dalton, g/mol, amu	80,000-380,000; 4000-6000 (DL); 100000 (L)	
Polydispersity, M _w /M _n	-	1.5-3.79	Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005.

PLA poly(lactic acid)

PARAMETER	UNIT	VALUE	REFERENCES
STRUCTURE			
Crystallinity	%	20-47; 25-70 (L-PLA); 10-20 (film); 65 (fiber), 20-36 (DSC); 20-44 (WAXD)	Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005; Rudnik, E; Briassoulis, D, Ind. Crops Prod., 33, 648-58, 2011; Tsai, C-C; Wu, R-J; Cheng, H-Y; Li, S-C; Siao, Y-Y; Kong, D-C; Jang, G-W, Polym. Deg. Stab., 95, 1292-98, 2010.
Cell type (lattice)	-	orthorhombic (α), hexagonal (α'), trigonal (β), monoclinic (γ)	
Cell dimensions	nm	a:b:c=1.06:0.61:2.88 (orthorhombic, α); a=b:c=1.052:0.88 (trigonal, β); a:b:c=0.995:0.625:0.88 (monoclinic, γ)	Johnson, C M; Sugiharto, A B; Roke, S, Chem. Phys. Lett., 449, 191-95, 2007; Lin, T T; Liu, X Y; He, C, Polymer, 51, 2779-85, 2010.
Polymorphs	-	α , α' , β , γ	Kalish, J P; Zeng, X; Yang, X; Hsu, S L, Polymer, in press, 2011.
Lamellae thickness	nm	2.03-28.6	Tsai, C-C; Wu, R-J; Cheng, H-Y; Li, S-C; Siao, Y-Y; Kong, D-C; Jang, G-W, Polym. Deg. Stab., 95, 1292-98, 2010.
Avrami constants, k/n	-	n=1.8-2.3	Tsai, C-C; Wu, R-J; Cheng, H-Y; Li, S-C; Siao, Y-Y; Kong, D-C; Jang, G-W, Polym. Deg. Stab., 95, 1292-98, 2010.
COMMERCIAL POLYMERS			
Some manufacturers	-	Cargill; Durect	
Trade names	-	PLA; Lactel	
COMMERCIAL POLYMERS			
Some manufacturers	-	Cargill; Durect	
Trade names	-	PLA; Lactel	
PHYSICAL PROPERTIES			
Density at 20°C	g cm ⁻³	1.21-1.29	
Refractive index, 20°C	-	1.35-1.45	
Transmittance	%	2.2	
Melting temperature, DSC	°C	164-178; 180-184 (L-PLA)	Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005.
Decomposition temperature	°C	>200	
Glass transition temperature	°C	55-75	Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005.
Specific heat capacity	J K ⁻¹ kg ⁻¹	540-600	
Heat of fusion	kJ mol ⁻¹	146	
Vicat temperature VST/A/50	°C	55-60	
Enthalpy of fusion	J g ⁻¹	21.9-43.8	
Hansen solubility parameters, dD, dP, dH	(J cm ⁻³) ^{0.5}	18.50, 9.70, 6.0	Agrawal, A; Saran, A D; Rath, S S; Khanna, A, Polymer, 45, 8603-12, 2004.
Radius of interaction	(J cm ⁻³) ^{0.5}	13.53	Agrawal, A; Saran, A D; Rath, S S; Khanna, A, Polymer, 45, 8603-12, 2004.
Hildebrand solubility parameter	MPa ^{0.5}	calc.=19.2-20.3; exp.=19.0-21.0	Auras, R; Harte, B; Selke, S, Antec, 2862-6, 2003.
Surface resistivity	ohm	1.9E11	Khoddami, A; Avinc, O; Ghahremanzadeh, F; Prog. Org. Coat., in press, 2011.
Permeability to nitrogen, 25°C	cm ³ cm ⁻³ cmHg ⁻¹ x 10 ⁴	2.2	Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006.

PLA poly(lactic acid)

PARAMETER	UNIT	VALUE	REFERENCES
Permeability to oxygen, 25°C	cm ³ cm ⁻³ cmHg ⁻¹ x 10 ⁴	2.2-4.9	Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006.
Permeability to water vapor, 25°C	cm ³ m ⁻² 24h ⁻¹	110	Zenkiewicz, M; Richert, J; Rytlewski, P; Moraczewski, K; Stepczynska, M; Karasiewicz, T, Polym. Test., 28, 412-18, 2009.
Diffusion coefficient of nitrogen	cm ² s ⁻¹ x10 ⁸	2.4	Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006.
Diffusion coefficient of oxygen	cm ² s ⁻¹ x10 ⁸	5.6-7.6	Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006.
MECHANICAL & RHEOLOGICAL PROPERTIES			
Tensile strength	MPa	52-72; 27-41 (DL); 55-82 (L)	
Tensile modulus	MPa	2700-16000	
Tensile stress at yield	MPa	65.6-77	Carrasco, F; Pages, P; Gamez-Perez, J; Santana, O O; Maspocho, M L, Polym. Deg. Stab., 95, 116-25, 2010.
Tensile creep modulus, 1000 h, elongation 0.5 max	MPa	48-70	
Elongation	%	4-6; 3-10 (DL); 5-10 (L)	
Tensile yield strain	%	2.4-10	
Flexural strength	MPa	83	
Flexural modulus	MPa	1,000-3,800	
Young's modulus	MPa	3,700-4,100	
Izod impact strength, notched, 23°C	J m ⁻¹	13-24.6	
Tenacity (fiber)	cN tex ⁻¹	32-36	
Intrinsic viscosity, 25°C	dl g ⁻¹	0.15-1.2	
Melt index, 230°C/3.8 kg	g/10 min	3-30	
Water absorption, equilibrium in water at 23°C	%	0.5	
CHEMICAL RESISTANCE			
Alcohols	-	poor	
Aromatic hydrocarbons	-	poor	
Esters	-	poor	
Greases & oils	-	good	
Halogenated hydrocarbons	-	poor	
Ketones	-	poor	
Good solvent	-	acetone, benzene, chloroform, m-cresol, dichloromethane, dioxane, DMF, ethyl acetate, isoamyl alcohol, toluene, xylene	
FLAMMABILITY			
Limiting oxygen index	% O ₂	19; 23-26 (with flame retardant)	
Heat release	kW m ⁻²	427	Wei, L-L; Wang, D-Y; Chen, H-B; Chen, L; Wang, X-L; Wang, Y-Z, Polym. Deg. Stab., in press, 2011.

PLA poly(lactic acid)

PARAMETER	UNIT	VALUE	REFERENCES
NBS smoke chamber	m ² kg ⁻¹	63	
Char at 500°C	%	0-1.4; 1.4-3.2 (with flame retardant)	Wei, L-L; Wang, D-Y; Chen, H-B; Chen, L; Wang, X-L; Wang, Y-Z, <i>Polym. Deg. Stab.</i> , in press, 2011.
Heat of combustion	J g ⁻¹	19,000	Perepelkin, K E, <i>Fibre Chem.</i> , 34, 2, 2002.
UL 94 rating	-	V-0 (FR)	
WEATHER STABILITY			
Depth of UV penetration	µm	bulk erosion	
Important initiators and accelerators	-	nano-titanium dioxide	
Products of degradation	-	double bonds, chain cleavage	
Stabilizers	-	Phenolic antioxidant: pentaerythritol tetrakis(3-(3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl)propionate); HAS: decanedioic acid, bis(2,2,6,6-tetramethyl-1-(octyloxy)-4-piperidiny) ester, reaction products with 1,1-dimethylethylhydroperoxide and octane; Phosphite: bis(2-ethylhexyl)phosphite	
BIODEGRADATION			
Typical biodegradants	-	composting: complete fragmentation in 15 days; degradation complete in 4.8 years at 25°C; lipases from <i>Cryptococcus sp.</i> and proteases from <i>Bacillus</i> strains	Hartmann, M; Whiteman, N, <i>Antec</i> , 4-8, 2001; Kawai, F; Nakada, KK; Nishioka, E; Nakajima, H; Ohara, H; Masaki, Iefuji, H, <i>Polym. Deg. Stab.</i> , 96, 1343-48, 2011.
TOXICITY			
NFPA: Health, Flammability, Reactivity rating	-	1/1/0	
Carcinogenic effect	-	not listed by ACGIH, NIOSH, NTP	
Oral rat, LD ₅₀	mg kg ⁻¹	>5,000	
Skin rabbit, LD ₅₀	mg kg ⁻¹	>2,000	
ENVIRONMENTAL IMPACT			
Aquatic toxicity, <i>Daphnia magna</i> , LC ₅₀ , 48 h	mg l ⁻¹	1,000	
Power consumption for production	MJ kg ⁻¹	92 (fiber)	Perepelkin, K E, <i>Fibre Chem.</i> , 34, 2, 2002.
CO ₂ liberation	kg kg ⁻¹	4.1-6.5	Perepelkin, K E, <i>Fibre Chem.</i> , 34, 2, 2002.
PROCESSING			
Typical processing methods	-	extrusion, extrusion coating, injection molding, microcellular foaming, spinning	
Preprocess drying: temperature/time/residual moisture	°C/h/%	80 (vac)/8/	
Processing temperature	°C	220-255 (extrusion); 280-300 (fibers)	
Processing pressure	MPa	82 (injection)	
Process time	min		

PLA poly(lactic acid)

PARAMETER	UNIT	VALUE	REFERENCES
Additives used in final products	-	Plasticizers: polyethylene glycol, polypropylene glycol, partial fatty ester, glucose monoester, citrate, adipate and azelate esters, epoxidized soybean oil, acetylated coconut oil, linseed oil, acetyl tributyl citrate, glycerol triacetate, glycerol tripropionate; Antistatics: ethoxylated fatty amines, polyethylene glycol ester, quaternary ammonium salt; Antiblocking: diatomaceous earth, talc; Slip: erucamide	
Applications	-	clip, envelope with window, fabrics, fibers, film, sheet, shopping bag, synthetic paper, trash bag	
Outstanding properties	-	sustainable, biodegradable	
BLENDS			
Suitable polymers	-	chitosan, PC, PCL, PEG, PET, PR, PVP, starch	
ANALYSIS			
FTIR (wavenumber-assignment)	cm ⁻¹ /-	C=O – 1748; reference – 1451	Rudnik, E; Briassoulis, D, Ind. Crops Prod., 33, 648-58, 2011.
Raman (wavenumber-assignment)	cm ⁻¹ /-	C-O – 1128; C-C – 1044	Yang, X; Kang, S; Yang, Y; Aou, K; Hsu, S L, Polymer, 45, 4241-48, 2004.
NMR (chemical shifts)	ppm	C NMR: C=O – 170.8; -CH – 70.5; -CH ₃ – 18.1	Zhang, X; Espiritu, M; Bilyk, A; Kurniawan, L, Polym. Deg. Stab., 93, 1964-70, 2008.

ANEXO 2

Ficha técnica del ABS

Datasheet



ABS Extrafill

Description:

Fillamentum ABS Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

ABS filament is suitable for the production of the first samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,04 g/cm ³	ISO 1183	23 °C
Melt volume index	29 cm ³ /10 min	ISO 1133	220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	+ 0,05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	39 MPa	ISO 527	at yield, 50 mm/min
	32 MPa	ISO 527	at break, 50 mm/min
Elongation at break	20 %	ISO 527	50 mm/min
Flexural strength	60 MPa	ISO 178	2 mm/min
Flexural modulus	1900 MPa	ISO 178	2 mm/min
Izod impact strength	24 kJ/m ²	ISO 180-1A	23 °C, notched
	10 kJ/m ²	ISO 180-1A	-30 °C, notched
Charpy impact strength	25 kJ/m ²	ISO 179	23 °C, notched
	11 kJ/m ²	ISO 179	-30 °C, notched

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Heat deflection temperature	81 °C	ISO 75-A	1,8 MPa
	103 °C	ISO 306	50 °C/h, 1 kg
Vicat softening temperature	96 °C	ISO 306	50 °C/h, 5 kg
Coefficient of linear thermal expansion	9,0 · 10 ⁻⁵	ISO 11359	

Printing properties	Recommended	Notes
Print temperature	220-240 °C	Recommended settings!
Hot pad	80-105 °C	It may differ according to the printer and the object. Try your own settings before printing.
Adhesive	3Dlac, glue stick	

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com

ANEXO 3

Curvas esfuerzo - deformación

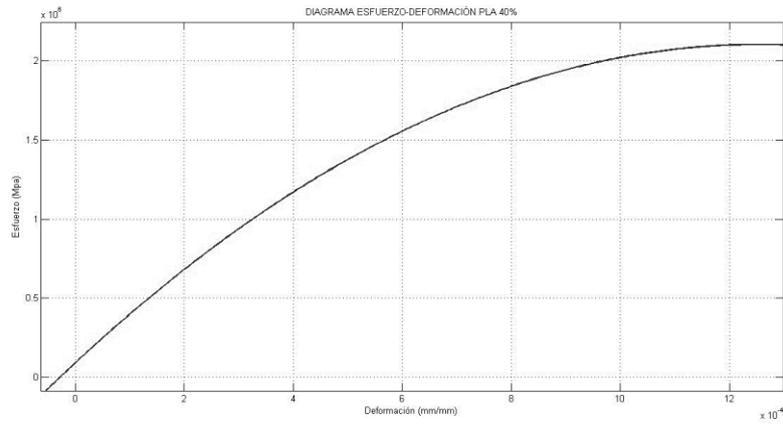


Figura 32. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 1. Fuente: Autor.

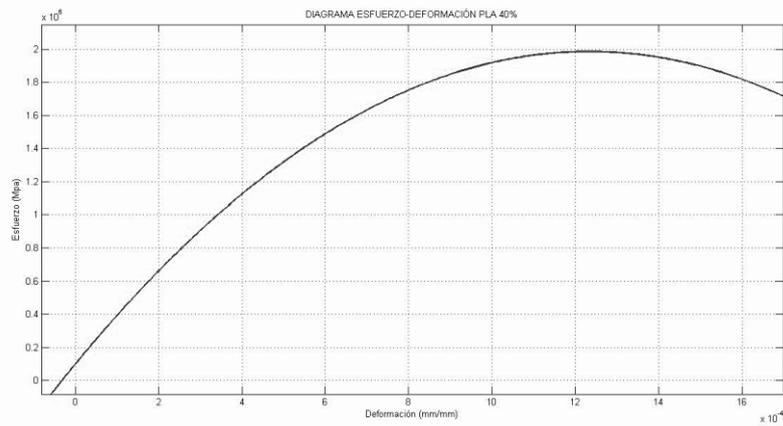


Figura 33. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 2. Fuente: Autor.

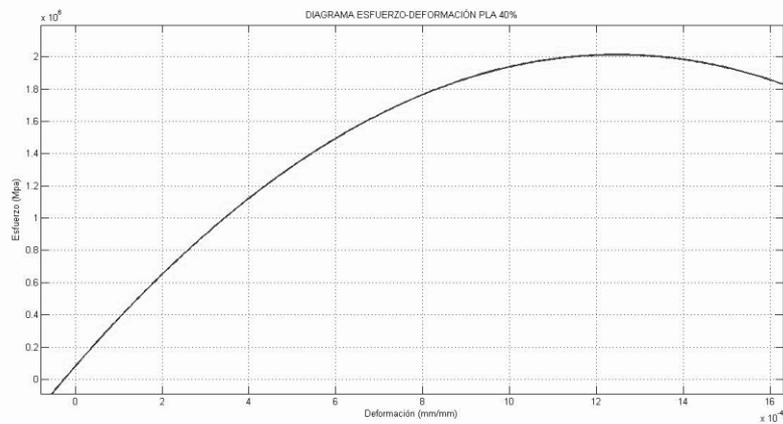


Figura 34. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 3. Fuente: Autor.

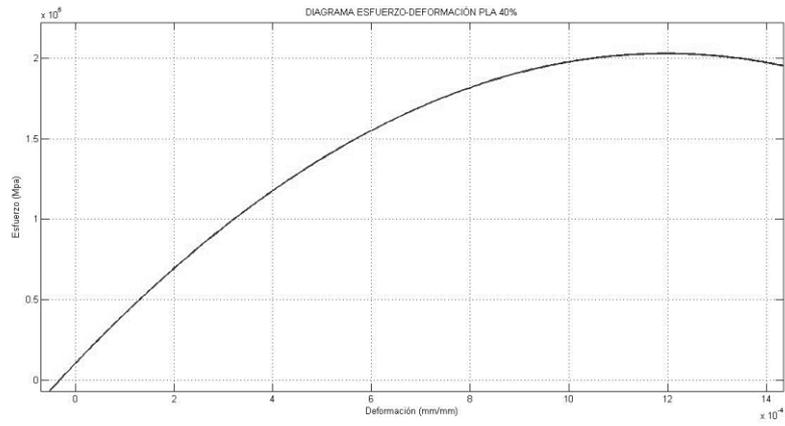


Figura 35. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 4. **Fuente:** Autor.

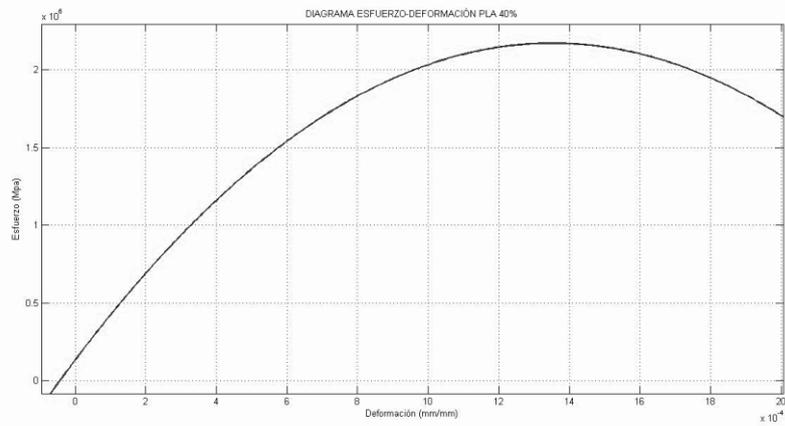


Figura 36. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 5. **Fuente:** Autor.

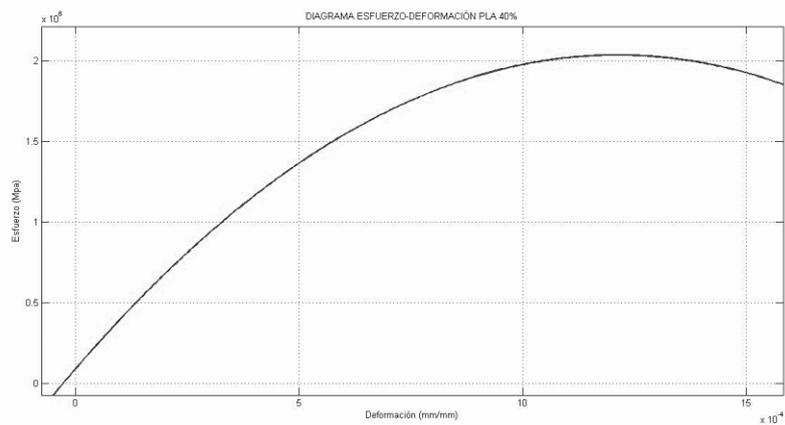


Figura 37. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 6. **Fuente:** Autor.

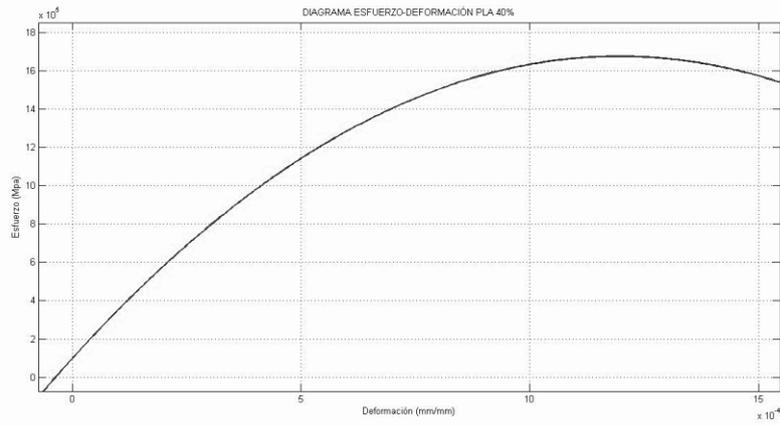


Figura 38. Diagrama esfuerzo deformación PLA 40% - Probeta 7. **Fuente:** Autor.

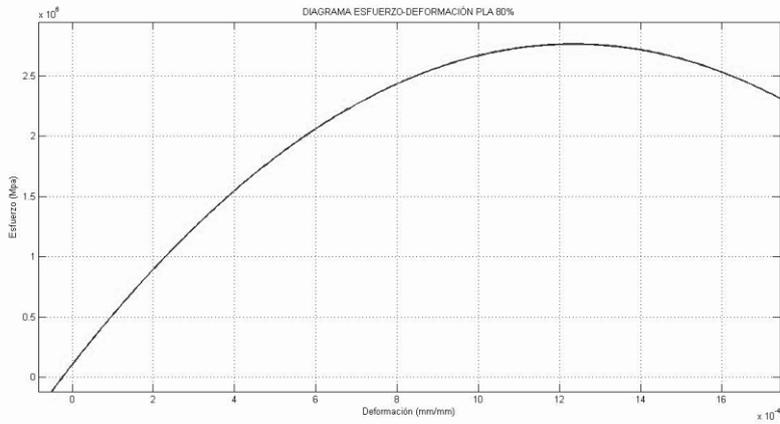


Figura 39. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 9. **Fuente:** Autor.

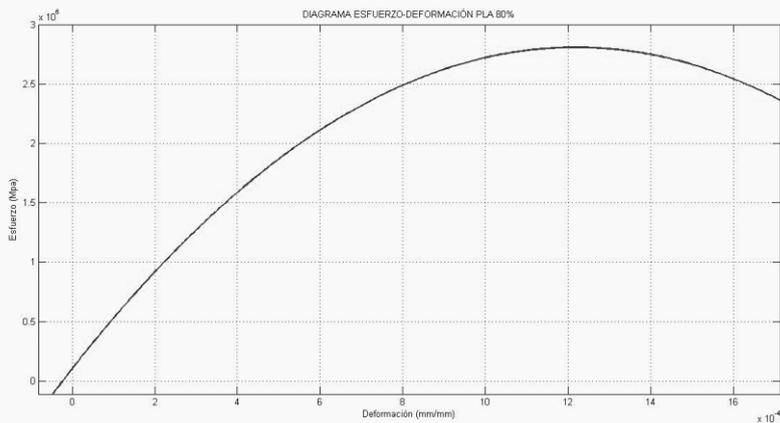


Figura 40. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 10. **Fuente:** Autor.

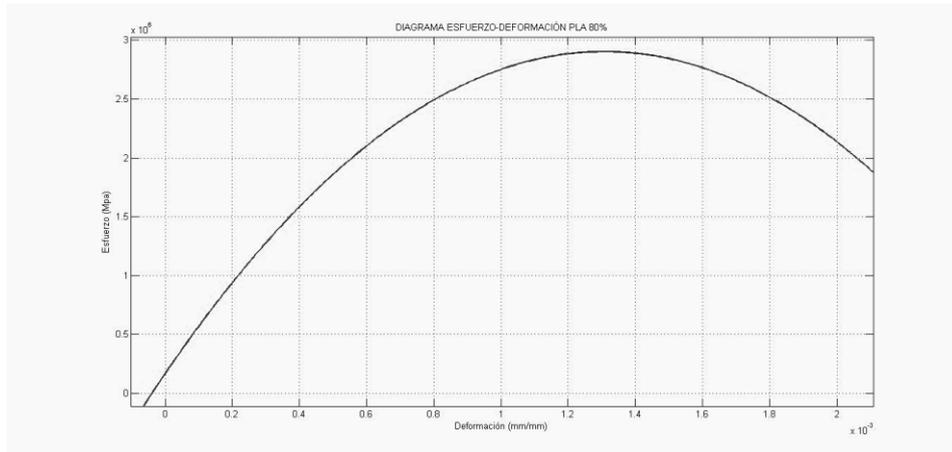


Figura 41. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 11. Fuente: Autor.

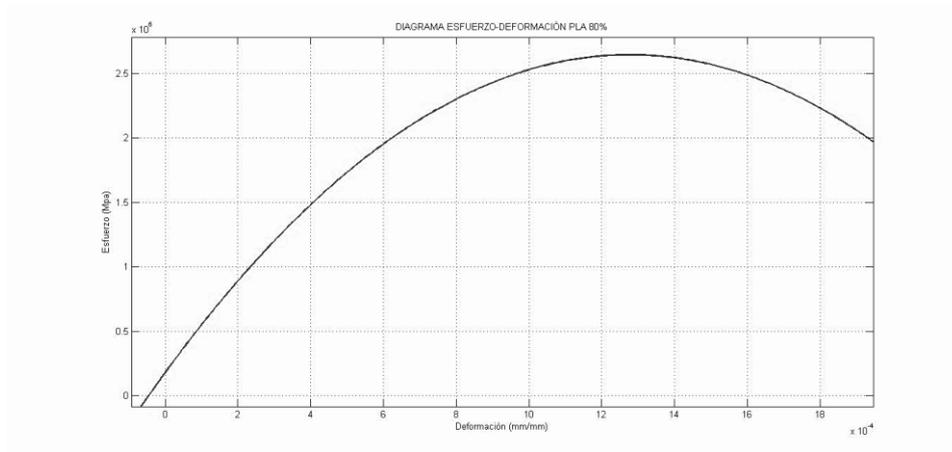


Figura 42. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 12. Fuente: Autor.

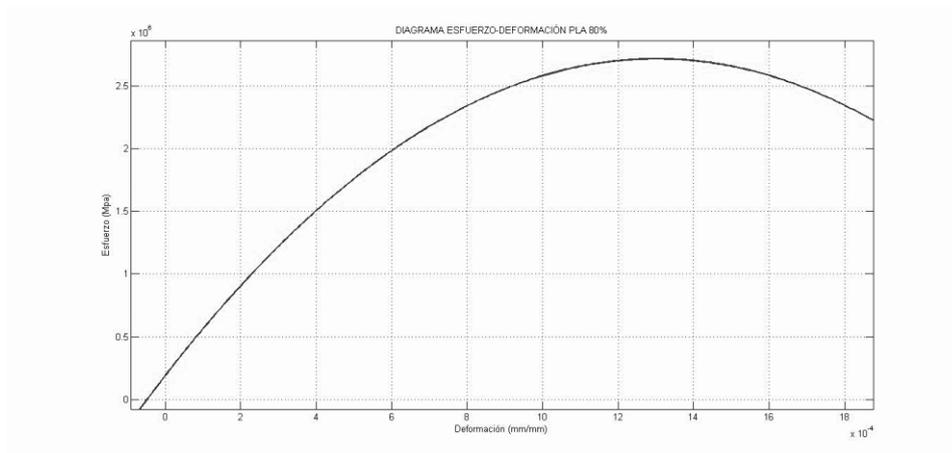


Figura 43. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 13. Fuente: Autor.

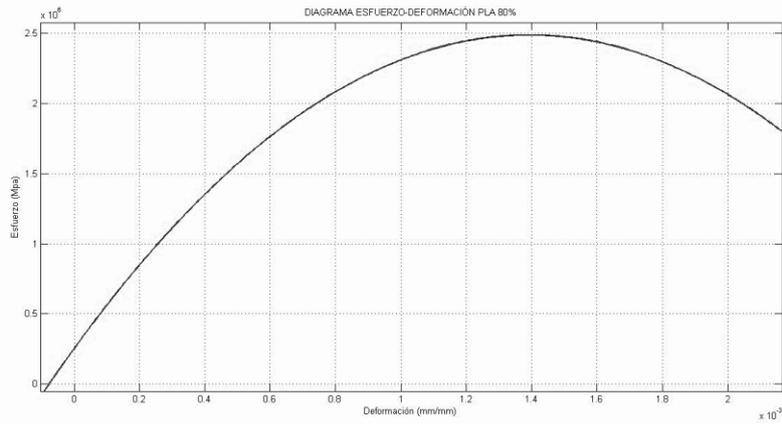


Figura 44. Diagrama esfuerzo deformación PLA 80% - Probeta 14. Fuente: Autor.

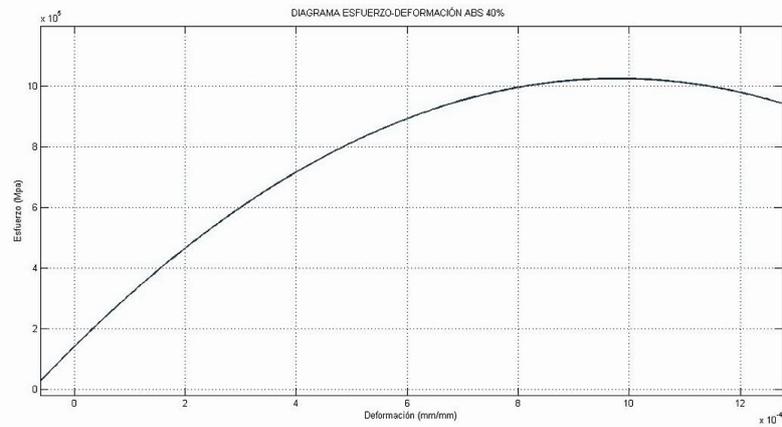


Figura 45. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 15. Fuente: Autor.

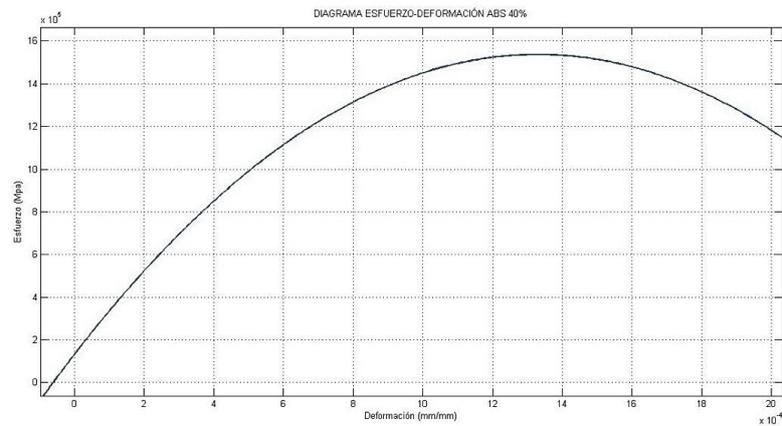


Figura 46. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 16. Fuente: Autor.

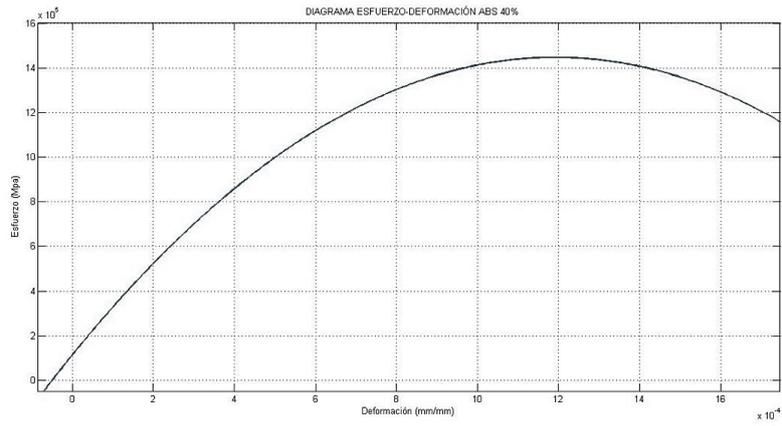


Figura 47. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 17. Fuente: Autor.

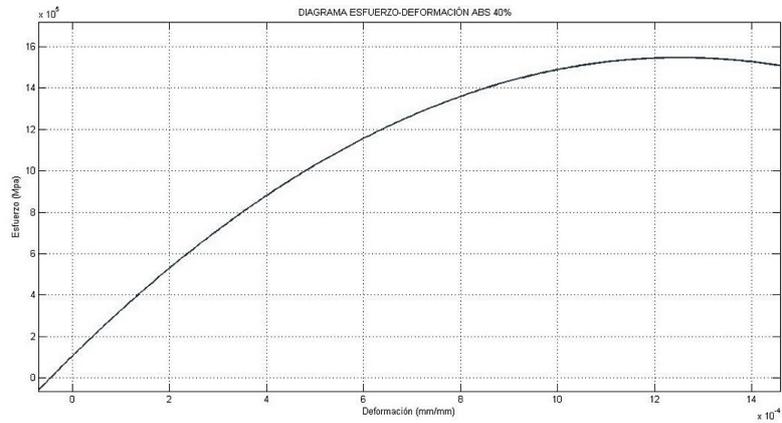


Figura 48. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 18. Fuente: Autor.

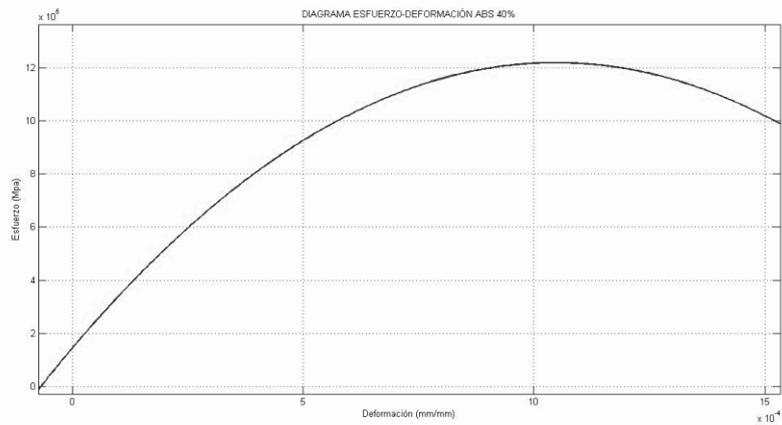


Figura 49. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 19. Fuente: Autor.

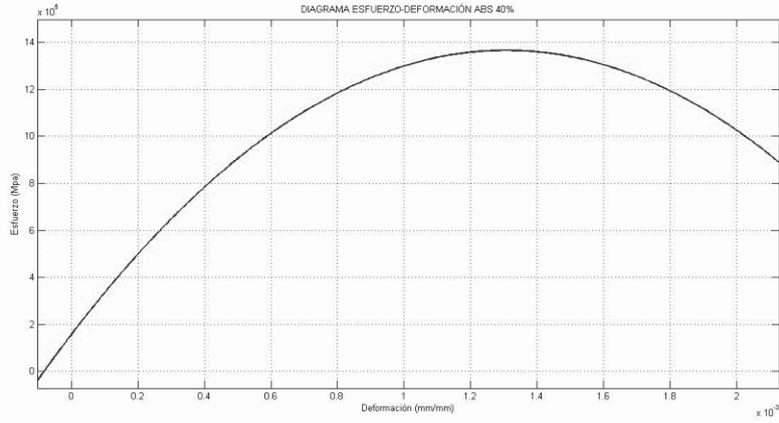


Figura 50. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 20. Fuente: Autor.

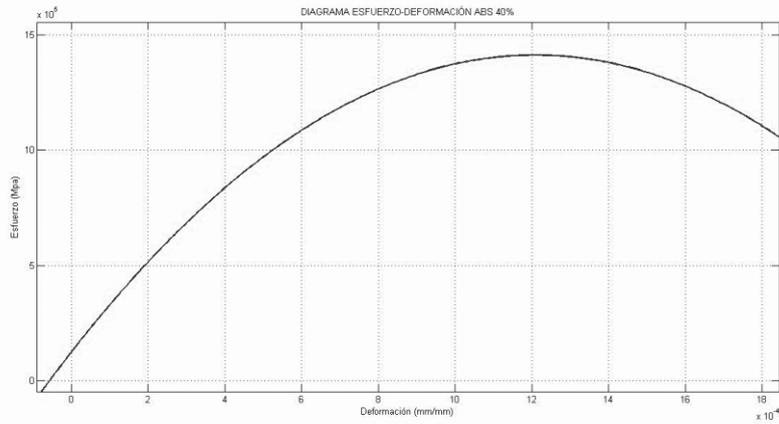


Figura 51. Diagrama esfuerzo deformación ABS 40% - Probeta 21. Fuente: Autor.

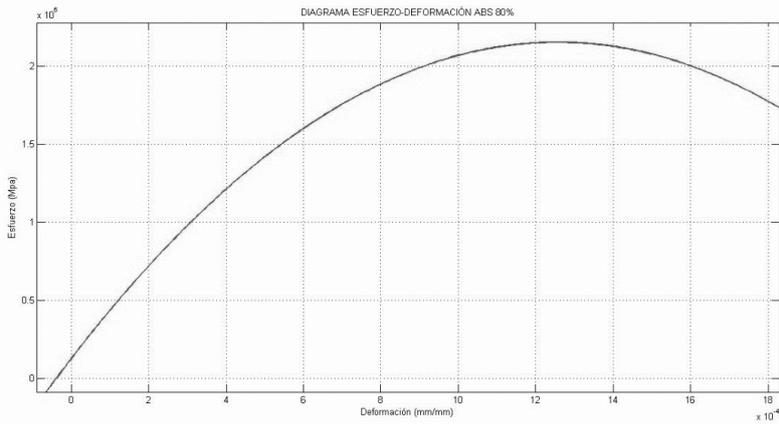


Figura 52. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 22. Fuente: Autor.

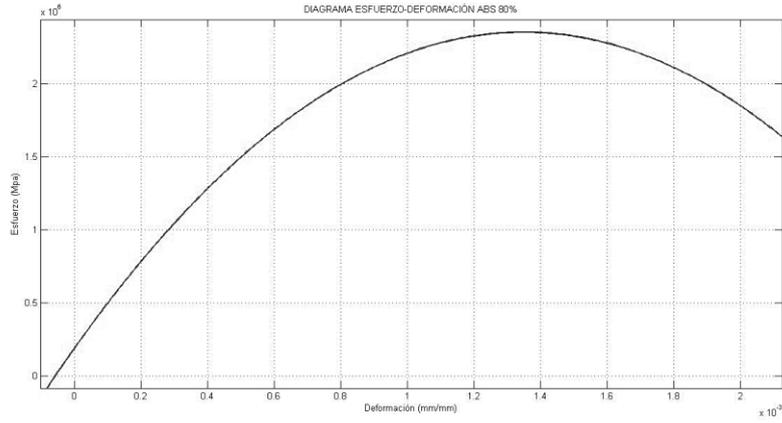


Figura 53. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 23. **Fuente:** Autor.

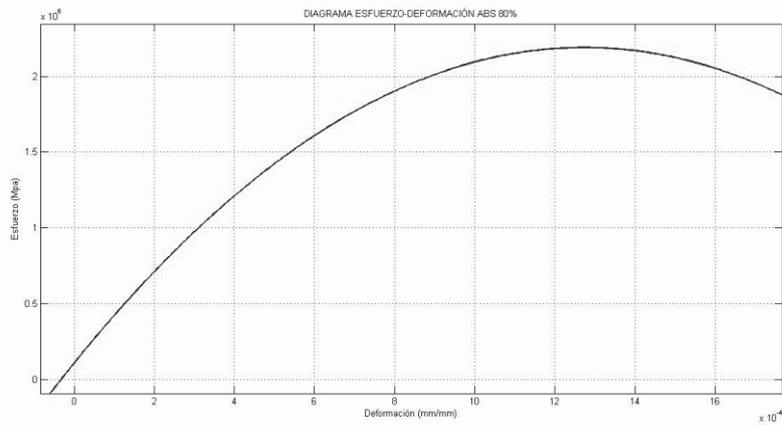


Figura 54. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 24. **Fuente:** Autor.

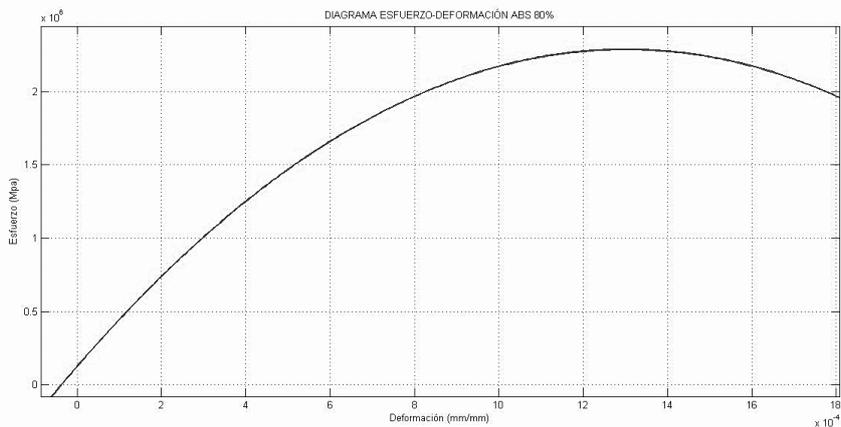


Figura 55. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 25. **Fuente:** Autor.

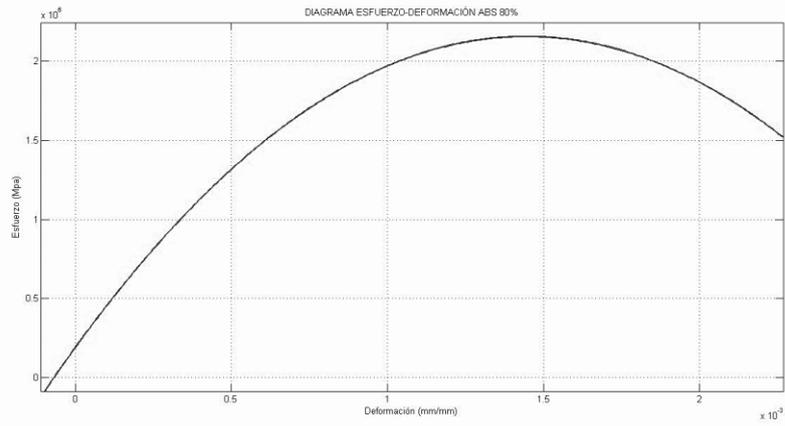


Figura 56. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 26. **Fuente:** Autor.

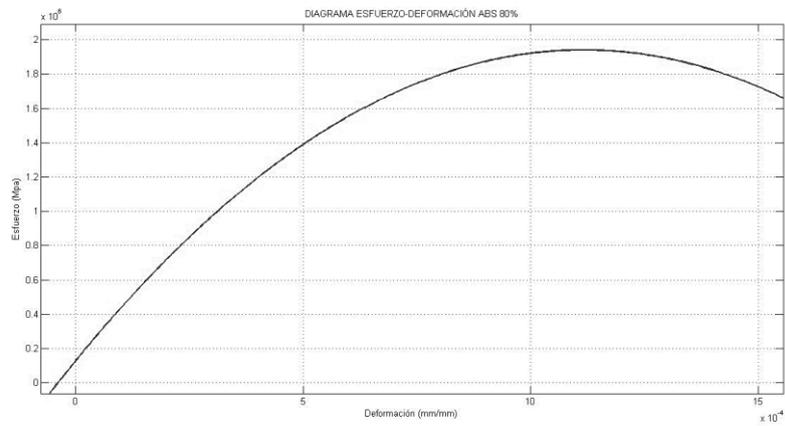


Figura 57. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 27. **Fuente:** Autor.

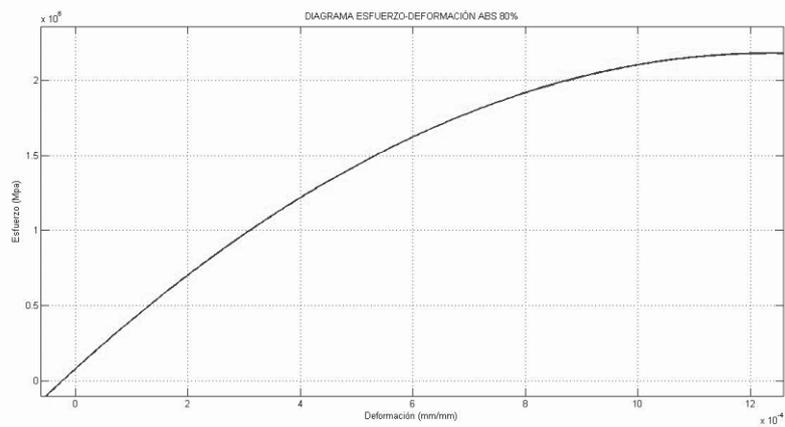


Figura 58. Diagrama esfuerzo deformación ABS 80% - Probeta 28. **Fuente:** Autor.

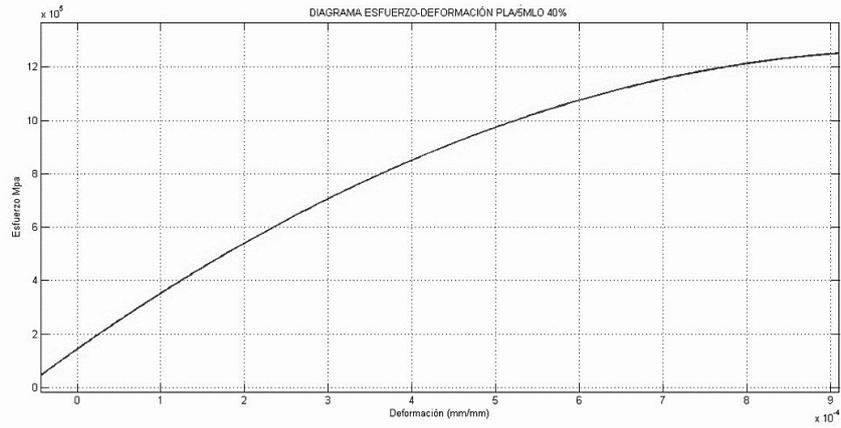


Figura 59. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 29. Fuente: Autor.

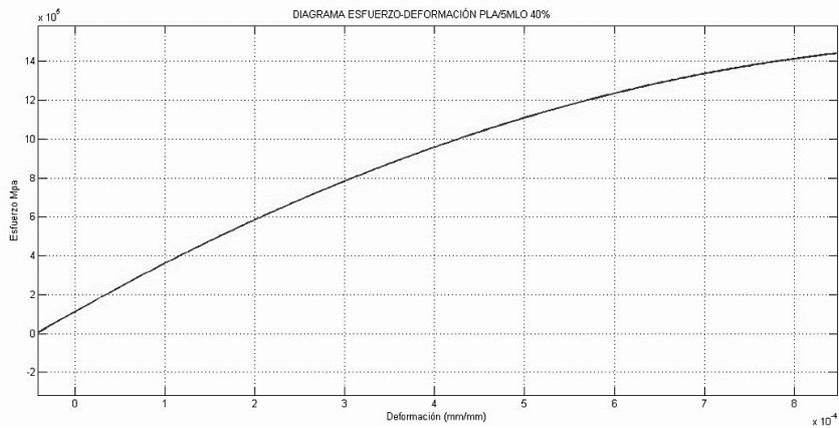


Figura 60. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 31. Fuente: Autor.

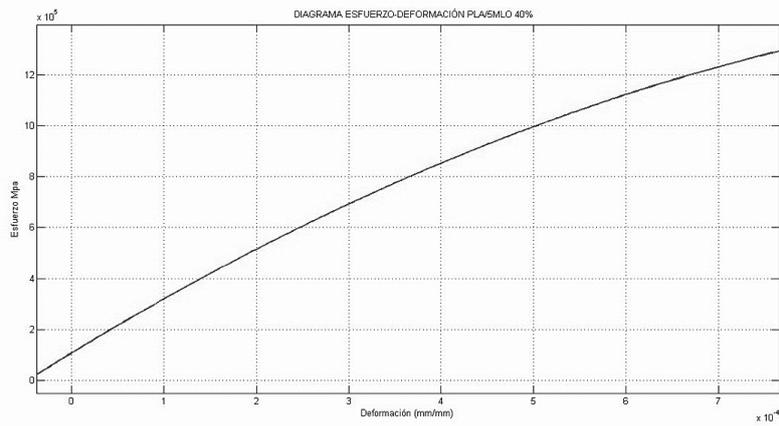


Figura 61. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 32. Fuente: Autor.

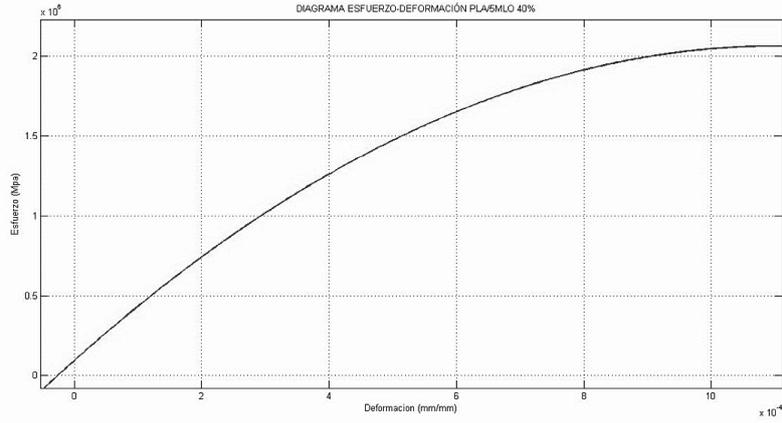


Figura 62. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 33. **Fuente:** Autor.

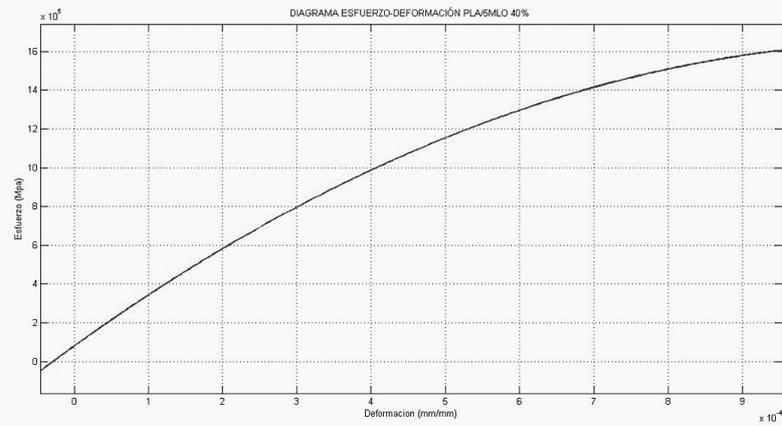


Figura 63. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 34. **Fuente:** Autor.

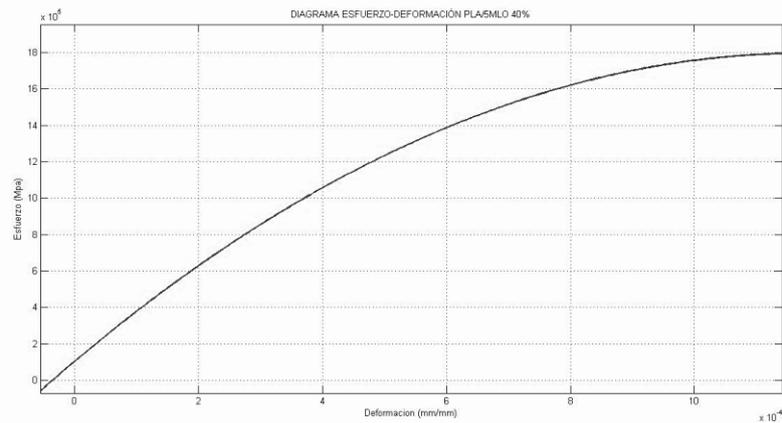


Figura 64. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 40% - Probeta 35. **Fuente:** Autor.

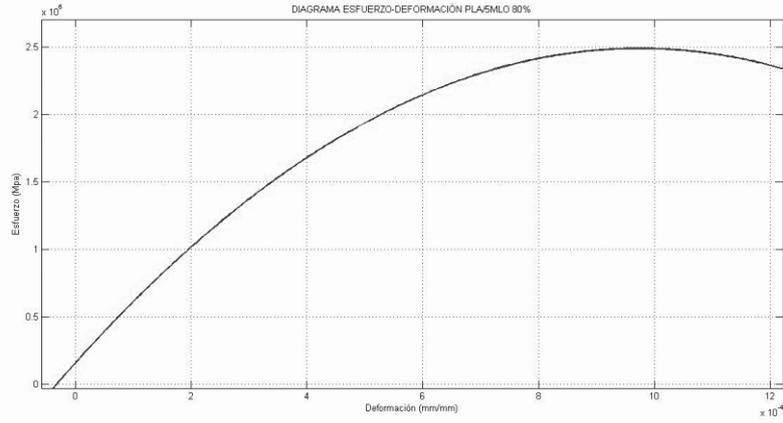


Figura 65. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 36. **Fuente:** Autor.

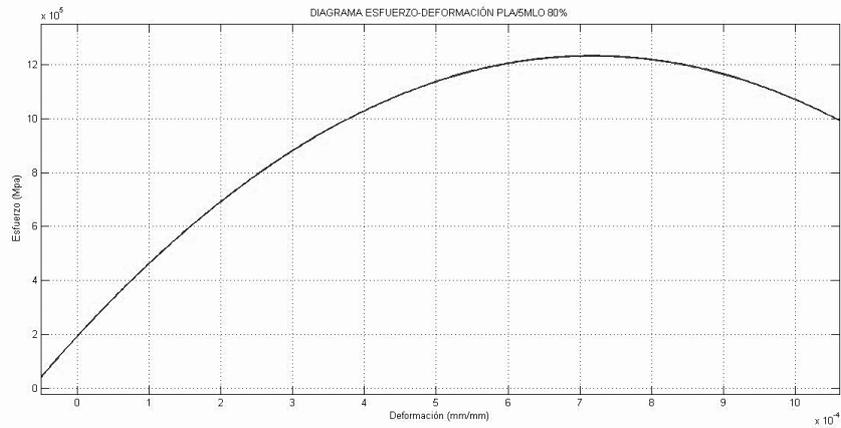


Figura 66. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 37. **Fuente:** Autor.

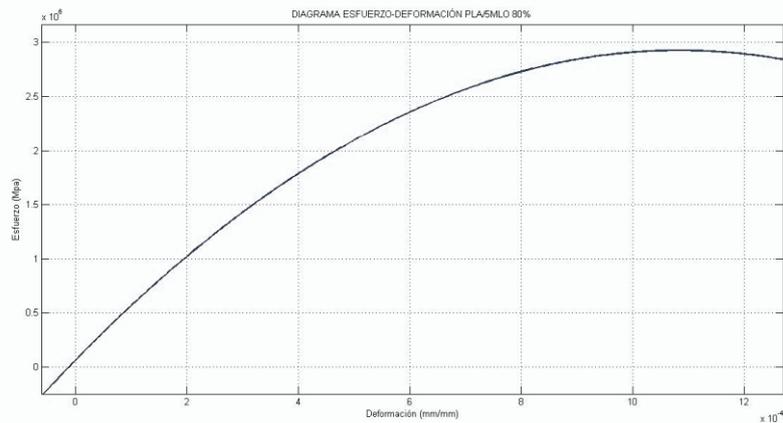


Figura 67. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 39. **Fuente:** Autor.

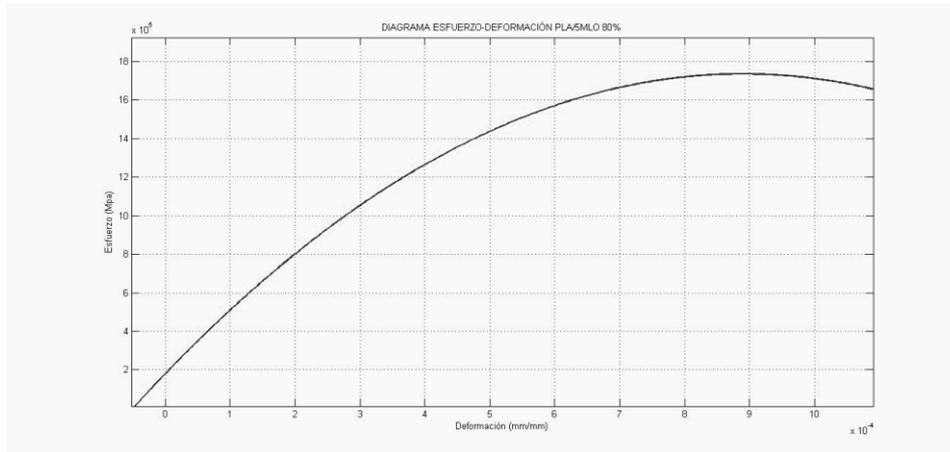


Figura 68. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 40. **Fuente:** Autor.

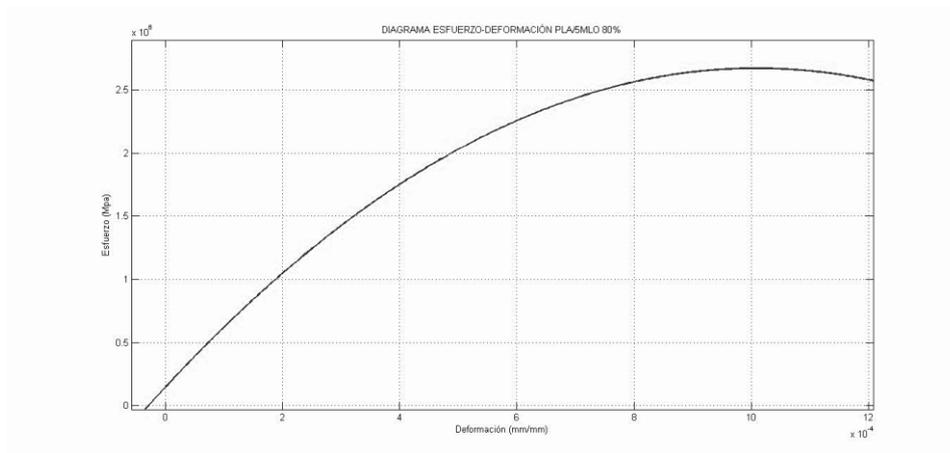


Figura 69. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 41. **Fuente:** Autor.

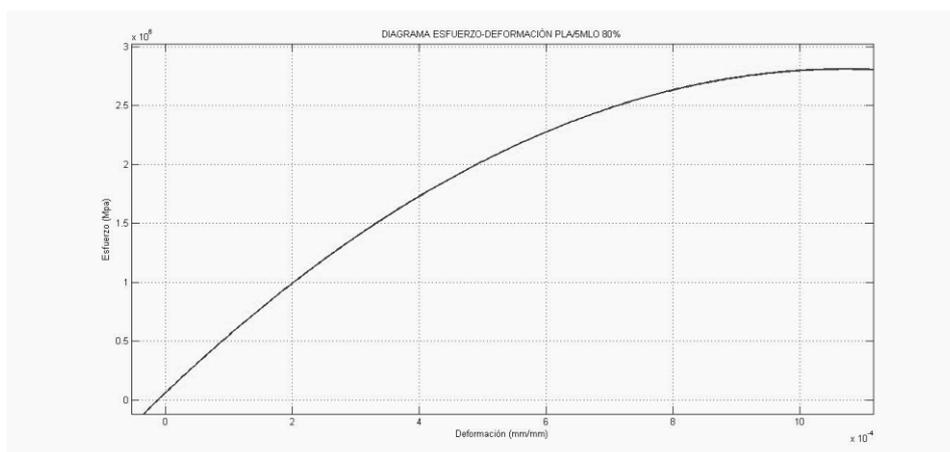


Figura 70. Diagrama esfuerzo deformación PLA/MLO 5phr 80% - Probeta 42. **Fuente:** Autor.