

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL

TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
MATERIALES IMPRESOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE
IMPRESIÓN 3D FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)”**

Autor: Cristian Fernando Urresta Pérez

Director: Ing. Carlos Alfonso Villarreal Bolaños MSc.

IBARRA – ECUADOR

2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	040155541-2		
APELLIDOS Y NOMBRES:	URRESTA PÉREZ CRISTIAN FERNANDO		
DIRECCIÓN:	TULCÁN, CDLA. PARQUE ARTESANAL		
EMAIL:	cfurresta@utn.edu.ec - urrestac@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062983859	Teléfono móvil:	0980284702

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES IMPRESOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)”
AUTOR:	URRESTA PÉREZ CRISTIAN FERNANDO
FECHA:	28-02-2020
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
DIRECTOR:	Ing. CARLOS VILLARREAL MSc.

2. CONSTANCIAS


iii

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de febrero de 2020

EL AUTOR:

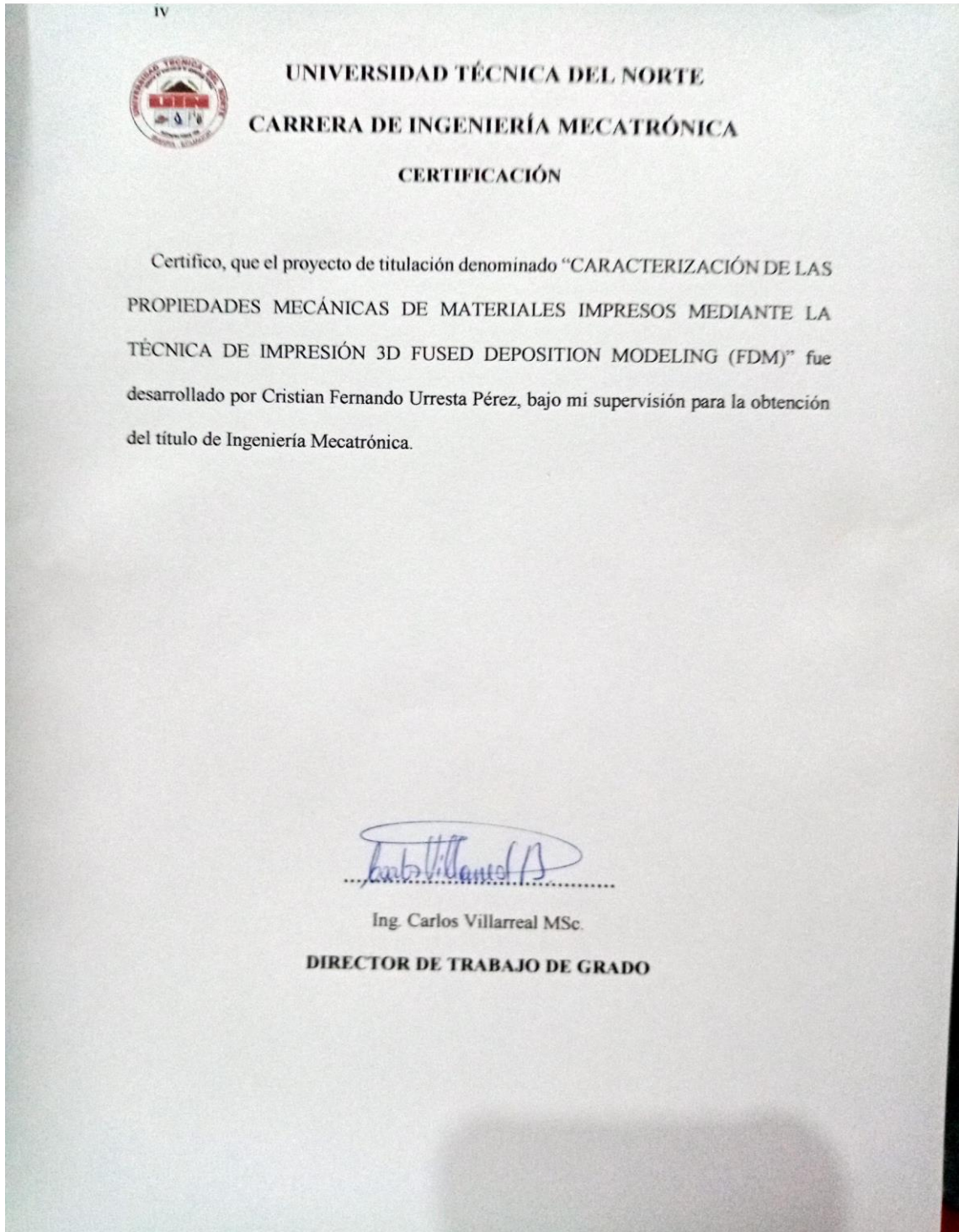


.....
Cristian Fernando Urresta Pérez

C.I.: 040155541-2



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CERTIFICACIÓN



IV



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CERTIFICACIÓN

Certifico, que el proyecto de titulación denominado "CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES IMPRESOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)" fue desarrollado por Cristian Fernando Urresta Pérez, bajo mi supervisión para la obtención del título de Ingeniería Mecatrónica.

Ing. Carlos Villarreal MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios y a mi familia por su apoyo en cada momento en este proceso difícil de formación en la carrera de ingeniería, especialmente a mi hermana Anahí por su cariño, a madre Olivia López y a mi padre Ramiro Urresta por darme la oportunidad de seguir adelante a pesar de los problemas a lo largo del camino de la vida universitaria.

A todos los Docentes que formaron parte del proceso desde el inicio de la carrera hasta el final, todos aportaron con sus conocimientos para formarme y ser un buen profesional. A mi Tutor y Cotutores del trabajo de grado gracias por su tiempo y dedicación para poder terminar y conseguir este gran objetivo.

A mis compañeros y amigos que conocí durante todo este tiempo, gracias por brindarme su amistad y también su apoyo en los buenos y malos momentos, espero contar con ustedes siempre.

Cristian Fernando Urresta Pérez



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DEDICATORIA

A mi madre Olivia y padre Ramiro por brindarme su apoyo incondicional y a mi madre Paty que me mira desde el cielo y está presente siempre en nuestros corazones.

A toda mi familia que me brindó su apoyo y ayudaron de cierta forma a cumplir con esta meta.

A mi hija Romina que es el motor que me hace seguir adelante, para cada día ser mejor padre, hijo, hermano y sobre todo ser mejor persona.

Cristian Fernando Urresta Pérez

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación consiste en caracterizar las propiedades mecánicas de la impresión 3D con materiales como el ABS y PLA mediante la tecnología FDM, para lo cual, se hace la impresión de las probetas que son sometidas a ensayos de tracción y flexión.

En el proceso de impresión 3D, se toma en consideración los parámetros de impresión, como el patrón de relleno, donde se utiliza 3 configuraciones diferentes: rejilla, triángulos y octeto, con una densidad de relleno del 100%.

Para la configuración de la impresión de las probetas de ensayo se utiliza el software libre “Ultimate Cura”.

La geometría de las probetas es acorde con las normas ASTM D638 Y ASTM D790 para ensayos de tracción y flexión respectivamente, para lo cual, se fabricaron 30 probetas en ABS y 30 probetas en PLA con las diferentes configuraciones propuestas.

Finalmente, se hace una simulación de los ensayos correspondientes mediante software SOLIDWORKS para analizar el porcentaje de error con respecto a la experimentación, obteniéndose mejores resultados para el PLA, sin embargo, en los ensayos de tracción no existe mucha diferencia con respecto al ABS.

Palabras clave: impresión 3D, ensayos de tracción, ensayos de flexión, Manufactura aditiva, FDM, Simulación.

ABSTRACT

The main objective of this research is to characterize the mechanical properties of 3D printing with materials such as ABS and PLA using FDM technology. To this end, the specimens are printed and subjected to tensile and flexural tests.

The 3D printing process takes into account the printing parameters, such as the filling pattern, where 3 different configurations are used: grid, triangles and octet, with a filling density of 100%.

The free software "Ultimate Cura" is used for the configuration of the printing of the test samples.

The geometry of the specimens is in accordance with the ASTM D638 and ASTM D790 standards for tensile and flexure tests respectively, for which 30 specimens were manufactured in ABS and 30 in PLA with the different configurations proposed.

Finally, a simulation of the corresponding tests is made by means of the SOLIDWORKS software to analyze the percentage of error with respect to the experimentation, obtaining better results for PLA, although in the tensile tests the difference with respect to ABS was not very great.

Keywords: 3D printing, tensile tests, flexural tests, additive manufacturing, FDM, Simulation.

TABLA DE CONTENIDOS

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
TABLA DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ABREVIATURAS.....	xx
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos	2
Justificación	2
Antecedentes.....	3
CAPÍTULO I	5
1. ESTADO DEL ARTE.....	5
1.1 Métodos de caracterización.....	5
1.1.1 Ensayo de Tracción.....	5
1.1.2 Ensayo de Flexión.....	12

1.1.3	Ensayo de Compresión.	18
1.1.4	Ensayo de Impacto.	18
1.2	Fabricación Aditiva.....	20
1.2.1	Características de la fabricación aditiva.	20
1.2.2	Ventajas de la Fabricación Aditiva.	21
1.2.3	Desventajas de la Fabricación Aditiva.....	22
1.2.3.1	Material.	22
1.2.3.2	Acabado y velocidad de fabricación.	23
1.2.3.3	Repetibilidad.	23
1.2.3.4	Tamaño.....	23
1.2.4	Métodos de Fabricación Aditiva.....	24
1.2.4.1	Estereolitografía (SLA).....	24
1.2.4.2	Procesamiento de luz digital (DLP).....	26
1.2.4.3	Sinterización selectiva por láser (SLS).....	27
1.2.4.4	Fabricación por corte y laminado (LOM).....	29
1.2.4.5	Tecnología PolyJet (PJ).....	30
1.2.4.6	Modelado por Deposición Fundida (FDM).....	31
1.2.4.6.1	Impresión 3D (FDM) con múltiples materiales.	33
1.2.4.6.2	Componentes y funcionamiento de una impresora 3D con tecnología FDM.....	34
1.2.4.6.3	Materiales para impresión 3D.	36
1.2.4.6.3.1	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	36

1.2.4.6.3.2	Ácido Poliláctico (PLA)	37
1.2.5	Espesor de capa	43
1.2.6	Air Gap	44
1.2.7	Densidad de relleno	44
1.2.8	Patrón de relleno	45
1.2.9	Orientación de Impresión	45
1.2.10	Temperatura de Extrusión y Plataforma o Cama	46
1.2.11	Velocidad de impresión	47
CAPÍTULO II		49
2.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	49
2.1	Diseño de las probetas	49
2.1.1	Ensayo de tracción	49
2.1.2	Ensayo de flexión	50
2.2	Diseño CAD y conversión a G-code	50
2.2.1	SolidWorks	50
2.2.2	Ultimate Cura	51
2.3	Parámetros de estudio	53
2.4	Características de los materiales utilizados	53
2.5	Características de la impresora	54
CAPÍTULO III		56
3.	ENSAYOS Y RESULTADOS	56
3.1	Impresión de probetas	56

3.2	Ensayo de Tracción.....	60
3.2.1	Diagramas esfuerzo deformación obtenidos en los diferentes ensayos de tracción.....	67
3.2.1.1	Diagramas esfuerzo deformación para PLA impreso.	67
3.2.1.1	Diagramas esfuerzo deformación para ABS impreso.	69
3.3	Ensayo de Flexión.....	73
3.3.1	Diagramas esfuerzo deformación obtenidos en los diferentes ensayos a flexión.	79
3.3.1.1	Diagramas esfuerzo deformación a flexión para PLA impreso.	79
3.4	Simulación	84
3.4.1	Simulación de los ensayos a tracción mediante software	87
3.4.2	Elementos finitos para flexión	90
CAPITULO IV		95
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
	Conclusiones.....	95
	Recomendaciones	97
REFERENCIAS.....		98
ANEXOS		105
	Anexo 1. Datasheet del filamento PLA	105
	Anexo 2. Datasheet del filamento ABS	107
	Anexo 3. Plano de la probeta de Flexión	110
	Anexo 4. Plano de la probeta de Tracción	111

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema de una máquina que realiza ensayo de tracción [11].....	5
<i>Figura 2.</i> Representación del Diagrama Esfuerzo-Deformación de un material frágil y otro dúctil [9]	6
<i>Figura 3.</i> Diagrama Esfuerzo-Deformación [12].	7
<i>Figura 4.</i> Diagrama de aplicación de carga a una probeta [14].....	9
<i>Figura 5.</i> Diagrama 3D de resultados obtenidos en [5].....	11
<i>Figura 6.</i> Vista lateral del diagrama 3D [5].	12
<i>Figura 7.</i> Configuración del ensayo de flexión a tres puntos (Izquierda) y configuración del ensayo de flexión a cuatro puntos (Derecha).	12
<i>Figura 8.</i> Curvas típicas del Esfuerzo-Deformación para ensayo de flexión.	13
<i>Figura 9.</i> Resistencia mecánica en probetas ensayadas de PLA impreso para diferentes configuraciones de relleno.	17
<i>Figura 10.</i> Resistencia mecánica a la tracción y a la flexión de ABS	17
<i>Figura 11.</i> Elementos en el análisis físico del péndulo de impacto.....	19
<i>Figura 12.</i> Rotores realizados mediante Fabricación Aditiva.	22
<i>Figura 13.</i> Impresora Box BLB Industries con volumen de impresión de 1500 x 1100 x 1500mm.....	24
<i>Figura 14</i> Esquema del método SLA	25
<i>Figura 15.</i> Prototipos realizados mediante Estereolitografía.	26
<i>Figura 16.</i> Esquema del método DLP	26
<i>Figura 17.</i> Exposición selectiva a la luz por un láser frente a un proyector.....	27
<i>Figura 18.</i> Esquema del método SLS.....	28
<i>Figura 19.</i> Prototipos realizados con el método SLS	29
<i>Figura 20.</i> Esquema del método LOM.....	29
<i>Figura 21.</i> Prototipos realizados mediante LOM.....	30
<i>Figura 22.</i> Esquema del proceso de fabricación Polyjet	31
<i>Figura 23.</i> Máquina que funciona con Tecnología Polyjet, modelo Connex 500 de la empresa Stratasys	31
<i>Figura 24.</i> Esquema del método FDM.....	32
<i>Figura 25.</i> Aspectos principales del procedimiento en impresión 3D.....	33

<i>Figura 26.</i> Esquema de la técnica de impresión de múltiples materiales	34
<i>Figura 27.</i> Partes fundamentales de una impresora 3D.....	34
<i>Figura 28.</i> Partes mecánicas de una impresora 3D	35
<i>Figura 29.</i> Esquema del cabezal de extrusión	35
<i>Figura 30.</i> Spinners realizados en impresión 3D con ABS	37
<i>Figura 31.</i> Presencia de warping	39
<i>Figura 32.</i> Rodamiento realizado con HIPS.....	39
<i>Figura 33.</i> Material PET en la industria embotelladora	39
<i>Figura 34.</i> Estuche de móvil donde se aprecia la flexibilidad del TPE.....	40
<i>Figura 35.</i> Fases del PVA utilizado como material de soporte	40
<i>Figura 36.</i> Botellas impresas en PETG	40
<i>Figura 37.</i> Fécula impresa en Nylon	40
<i>Figura 38.</i> Molde para fabricación de botellas impreso en Policarbonato	41
<i>Figura 39.</i> Piezas fabricadas en fibra de carbono.....	41
<i>Figura 40.</i> Diseños de termoplásticos de alto rendimiento	41
<i>Figura 41.</i> Filamentos de PLA-Madera y PLA-Cobre	42
<i>Figura 42.</i> Bicicleta impresa en 3D.....	42
<i>Figura 43.</i> Impresión de esternón para implante.....	42
<i>Figura 44.</i> Anillo realizado en ORO mediante impresión 3D.....	42
<i>Figura 45.</i> Prototipos con diferente espesor de capa.....	43
<i>Figura 46.</i> Contacto entre filamentos	44
<i>Figura 47.</i> Ejemplos de porcentajes de densidad	45
<i>Figura 48.</i> Diferentes configuraciones de patrones de relleno para impresión 3D	45
<i>Figura 49.</i> Pieza en forma de “U” con orientación diferente de impresión.....	46
<i>Figura 50.</i> Representación de la Carga máxima dependiendo de la orientación.....	46
<i>Figura 51.</i> Error en la adherencia de las capas debido a una velocidad de impresión muy elevada	48
<i>Figura 52.</i> Diseño de probeta según norma ASTM D638-14	49
<i>Figura 53.</i> Dimensiones de la probeta para los ensayos a tracción según norma ASTM D638-14.....	50
<i>Figura 54.</i> Dimensiones de la probeta para ensayos de flexión según Norma ASTM D679-10.....	50
<i>Figura 55.</i> Diseño CAD de probeta para ensayo de tracción.	51

<i>Figura 56.</i> Diseño CAD de probeta para ensayo de flexión.....	51
<i>Figura 57.</i> Ventana del software cura.	52
<i>Figura 58.</i> Impresora 3D Ender 3 Pro.....	54
<i>Figura 59.</i> Probetas de tracción y flexión impresas en PLA.	56
<i>Figura 60.</i> Probetas de tracción y flexión impresas en ABS.....	57
<i>Figura 61.</i> Máquina de ensayos a tracción y flexión.....	60
<i>Figura 62.</i> Extensómetro de la máquina de ensayos.	60
<i>Figura 63.</i> Probetas impresas en “PLA” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas.	62
<i>Figura 64.</i> Probetas impresas en “PLA” con patrón de triángulo, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas	63
<i>Figura 65.</i> Probetas impresas en “PLA” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas	64
<i>Figura 66.</i> Probetas impresas en “ABS” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y, b) luego de ser ensayadas.	64
<i>Figura 67.</i> Probetas impresas en “ABS” con patrón de triángulos, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas.	65
<i>Figura 68.</i> Probetas impresas en “ABS” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y, b) luego de ser ensayadas.	66
<i>Figura 69.</i> Diagrama esfuerzo – deformación para “PLA” impreso al 100% “mallado en rejilla”.....	67
<i>Figura 70.</i> Diagrama esfuerzo – deformación para “PLA” impreso al 100% “mallado en triángulos”.	68
<i>Figura 71.</i> Diagrama esfuerzo – deformación para “PLA” impreso al 100% “mallado en octeto”.	68
<i>Figura 72.</i> Diagrama esfuerzo – deformación para “ABS” impreso al 100% “mallado en rejilla”.	70
<i>Figura 73.</i> Diagrama esfuerzo – deformación para “ABS” impreso al 100% “mallado en triángulos”.	71
<i>Figura 74.</i> Diagrama esfuerzo – deformación para “ABS” impreso al 100% “mallado en octeto”.	71
<i>Figura 75.</i> Máquina realizando ensayo de flexión.	73
<i>Figura 76.</i> Probetas impresas en “PLA” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.	74
<i>Figura 77.</i> Probetas impresas en “PLA” con patrón de triángulos, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.	75

<i>Figura 78.</i> Probetas impresas en “PLA” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.	76
<i>Figura 79.</i> Probetas impresas en “ABS” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.	77
<i>Figura 80.</i> Probetas impresas en “ABS” con patrón de triángulos, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.	78
<i>Figura 81.</i> Probetas impresas en “ABS” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.	79
<i>Figura 82.</i> Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “PLA” impreso al 100% “mallado en rejilla”	79
<i>Figura 83.</i> Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “PLA” impreso al 100% “mallado en triángulos”	80
<i>Figura 84.</i> Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “PLA” impreso al 100% “mallado en octeto”	81
<i>Figura 85.</i> Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “ABS” impreso al 100% “mallado en rejilla”	82
<i>Figura 86.</i> Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “ABS” impreso al 100% “mallado en triángulos”	82
<i>Figura 87.</i> Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “ABS” impreso al 100% “mallado en octeto”	83
<i>Figura 88.</i> Condiciones del análisis estático.	85
<i>Figura 89.</i> Representación de convergencia de la malla.	87
<i>Figura 90.</i> Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en rejilla al 100%.	87
<i>Figura 91.</i> Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en triángulos al 100%.	88
<i>Figura 92.</i> Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en octeto al 100%.	88
<i>Figura 93.</i> Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en rejilla al 100%.	89
<i>Figura 94.</i> Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en triángulos al 100%.	89
<i>Figura 95.</i> Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en octeto al 100%.	90
<i>Figura 96.</i> Simulación a flexión para PLA de la configuración de impresión en rejilla al 100%.	91
<i>Figura 97.</i> Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en triángulos al 100%.	92

Figura 98. Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en octeto al 100%.92

Figura 99. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en rejilla al 100%.93

Figura 100. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en triángulos al 100%.93

Figura 101. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en octeto al 100%.94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de impresión de Ruiz Domínguez et al. (2019).....	9
Tabla 2. Resultados de ensayo de tracción obtenidos en Ruiz Domínguez et al. (2019)	9
Tabla 3. Parámetros y resultados de ensayos de tracción en investigación Caminero et al. (2019).....	10
Tabla 4. Parámetros de impresión y resultados de ensayo de tracción Hou et al. (2018).	11
Tabla 5. Resultados de ensayo de flexión de Caminero et al. (2019).	15
Tabla 6. Resultados de ensayo de flexión de Molina Osejos (2016).	16
Tabla 7. Resultados de ensayo de flexión de Shabana et al.(2019).....	18
Tabla 8. Componentes del cabezal de extrusión	36
Tabla 9. Características de materiales utilizados en la impresión 3D con tecnología FDM	39
Tabla 10. Propiedades mecánicas de materiales para la impresión 3D.....	43
Tabla 11. Rangos de velocidad dependiendo de la zona de impresión.	48
Tabla 12. Medidas de Probetas para ensayo de Tracción	49
Tabla 13. Parámetros de estudio	53
Tabla 14. Propiedades del material PLA usado en la impresión de probetas.....	53
Tabla 15. Propiedades del material ABS usado en la impresión de probetas	54
Tabla 16. Características de la impresora 3D Ender 3 pro.....	55
Tabla 17. Resultados de la impresión de probetas a tracción.....	58
Tabla 18. Resultados de la impresión de probetas a flexión	59
Tabla 19. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Rejilla en PLA.....	61
Tabla 20. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Triángulos en PLA	62
Tabla 21. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Octeto en PLA.....	63
Tabla 22. Resultado de ensayo de tracción de probetas con patrón Rejilla en ABS	64
Tabla 23. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Triángulos en ABS	65
Tabla 24. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Octeto en ABS	66
Tabla 25. Resumen de características mecánicas a tracción.	72
Tabla 26. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Rejilla en PLA	73
Tabla 27. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Triángulos en PLA.....	74
Tabla 28. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Octeto en PLA	75
Tabla 29. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Rejilla en ABS	76

Tabla 30. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Triángulos en ABS	77
Tabla 31. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Octeto en ABS	78
Tabla 32. Resumen de características mecánicas a flexión.....	84
Tabla 33. Propiedades del material para la simulación.....	85
Tabla 34. Tamaños utilizados en la malla.....	86
Tabla 35. Parámetros para simulación de ensayo a tracción.....	87
Tabla 36. Resumen de resultados de simulación vs ensayos mecánicos a tracción.....	90
Tabla 37. Parámetros para la simulación de ensayo de flexión	91
Tabla 38. Resumen de resultados de simulación vs ensayos mecánicos a flexión.....	94

ABREVIATURAS

AM	Manufactura aditiva
FDM	Manufactura por deposición fundida
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
PLA	Ácido Poliláctico
SLA	Estereolitografía
DLP	Procesamiento de luz digital
SLS	Sinterizado por láser
LOM	Técnica de laminación
PJ	Polyjet

INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva (AM) ha evolucionado en los últimos años, la cual, se presenta como una nueva alternativa con nuevos métodos y ventajas con respecto a los demás métodos convencionales, la cual presenta campos de aplicación cada día más innovadores. En este proceso existen variables de impresión que influyen en las propiedades mecánicas de los elementos manufacturados. Así, la temperatura, densidad, velocidad, y patrones de impresión influyen de manera directa o indirecta en la resistencia del prototipo [1].

Actualmente la impresión 3D permite que nuevas personas se aventuren a crear sus propios diseños, ya que adquirir estas máquinas de impresión 3D es muy fácil, e incluso, no son tan costosas. En el campo de la impresión 3D existen varias tecnologías y métodos de fabricación que tienen una característica en común, que es la adición de material para lograr un prototipo con un buen acabado superficial, sin embargo, sus propiedades mecánicas son desconocidas ya que no se encuentran especificadas y por lo tanto, su incertidumbre con respecto a su aplicación en la manufactura de elementos mecánicos [2]. Así, la impresión 3D mediante *Fused Deposition Modeling* (FDM) es una de las técnicas que se emplea en diversos campos de aplicación, como: la arquitectura, medicina, manufactura y también en la ingeniería [3].

Debido a esto se va a realizar ensayos mecánicos con probetas impresas mediante la técnica FDM con los materiales más utilizados PLA y ABS, que permitan obtener parámetros de impresión con mejores propiedades mecánicas en los prototipos. Para lo cual, se plantea los siguientes objetivos:

Objetivo general

Determinar las propiedades mecánicas de los materiales impresos ABS y PLA, mediante ensayos mecánicos de probetas impresas.

Objetivos específicos

- Determinar los parámetros a variar para la caracterización de materiales impresos.
- Manufacturar las probetas mediante impresión 3D, con la técnica FDM.
- Caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales impresos PLA y ABS mediante ensayos mecánicos.
- Especificar las condiciones óptimas de impresión para obtener las mejores propiedades mecánicas.

Justificación

El prototipado rápido (RP) mediante impresoras 3D está tan a la moda que su uso es cada vez más común entre los procesos de fabricación y diseño; además varios aspectos como los avances de la tecnología y la disminución de precios en especial de las impresoras y sus materiales que en su mayoría son termoplásticos como el plástico ingenieril o ABS y el plástico bio-degradable o PLA, hace que esta nueva tecnología domine algunas áreas de ingeniería [4].

La impresión 3D permite realizar prototipos partiendo de modelos 3D que se diseñan mediante softwares en un ordenador, que ocasiona que se reduzca los tiempos y costos de fabricación, por lo tanto, el diseño de una pieza para cualquier ensamble mecánico ya no requiere de moldes o matrices que son muy costosas, las cuales son utilizadas por métodos de sustracción como el torneado, fresado y otros más [2].

Como consecuencia de los aspectos mencionados de tiempo y costo, la adquisición de impresoras 3D para el diseño y fabricación de piezas mecánicas es poco a poco más común ya sea por personas expertas, empresas grandes o simplemente aficionados, pero no toman precauciones con respecto a los parámetros que afectan a los diseños.

Consecuentemente debido a esta poca información o simplemente falta de importancia de los parámetros que influyen en el proceso, se realizó ésta investigación sobre RP que

servirá de ayuda y apoyo para que todo lo relacionado con prototipado rápido muestre mayor eficiencia y confiabilidad de manera que los diseños obtengan mejor resistencia y puedan ser utilizados de mejor manera en proyectos futuros, proporcionando a los diseñadores la libertad para fabricar a gran escala los diseños para así verificar la facilidad y funcionalidad de las piezas dependiendo del mecanismo o ensamble al que pertenezca, facilitando así minimizar errores, costos que se ven simplificados aproximadamente en un 70% y tiempos de fabricación a un 90% [1].

Antecedentes

Al tener muchas variables respecto a la impresión 3D especialmente con la técnica FDM se han realizado investigaciones en las que se detalla el comportamiento de los objetos o piezas construidas mediante esta técnica, en la investigación: *Ultimate Tensile Strength in Fused Deposition Modeling Considering Process Parameters of Flow Rate and Printing Head Speed*, se examinan los efectos de la velocidad de flujo y la velocidad del cabezal de impresión para obtener la resistencia a la tracción máxima, utilizando PLA y realizando cinco especímenes para obtener los resultados [5].

Por otra parte, en el trabajo denominado: *“Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida”* se realizó ensayos de tracción, flexión, dureza y termogravimetría ; analizando parámetros como: geometría, postratamiento térmico, control ambiental(humedad y temperatura), patrón de relleno (rectangular y concéntrico), posición de impresión y se utilizó PLA blanco como material de impresión [1].

En *“Tensile Strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing”* se investigó las propiedades mecánicas de las piezas impresas por FDM utilizando una impresora 3D comercial de código abierto que puede usar variedad de materiales y se demostró que la resistencia a la tracción de una muestra impresa en 3D depende en gran medida de la masa de la muestra, para todos los materiales que se

estudiaron. Los materiales fueron: ABS, HIPS en diferentes colores, Nylon 618, Policarbonato, T-Glase en diferentes colores, Ninjaflex y otros más. Obteniendo como mejor resultado de Esfuerzo máximo a la tracción 49MPa que se consiguió con el Policarbonato. [6].

También, se evalúa el rendimiento mecánico de ABS y PLA cuando son multicapa, mediante ensayos de tracción, flexión, compresión, la micro dureza y rugosidad utilizando normas ASTM En la investigación, *Evaluating the Mechanical Properties of Commonly Used 3D Printed ABS and PLA Polymers with Multi Layered Polymers*”, [7].

En la actualidad (en la investigación “*Experimental study on mechanical properties of single and dual –material 3D printed products*”), también se ha hecho ensayos de tracción utilizando PLA y ABS, donde las probetas son impresas con un solo material y luego se realiza combinaciones en PLA con ABS y viceversa, variando porcentajes de cada uno y así identificar cuáles son las probetas que consiguen mayor resistencia además se analiza los parámetros de orientación y densidad de relleno y temperatura [8].

Luego de realizar un estudio de los antecedentes y de algunas investigaciones realizadas en años anteriores, en el siguiente capítulo se citarán resultados obtenidos para poder utilizarlos como fuente de comparación con los resultados que se consigan al final de la investigación.

CAPÍTULO I

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Métodos de caracterización

1.1.1 Ensayo de Tracción.

El ensayo de tracción es uno de los estudios más utilizados para la caracterización de materiales, este ensayo cuenta con las características de ser muy simple, barato, y ya se encuentra normalizado [9].

El ensayo de tracción consiste en aplicar una fuerza axial que tratará de estirar una probeta ya estandarizada hasta llegar a la zona de rotura, siendo esto la medida de la resistencia del material a la fuerza aplicada que puede ser estática o aplicada lentamente [10]. Esto puede realizarse gracias a que siempre una de las mordazas de la máquina universal es móvil para así aplicar la carga bajo una velocidad de calibración durante todo el ensayo [9], el esquema de la máquina universal de ensayo de tracción se lo muestra en la Figura 1.

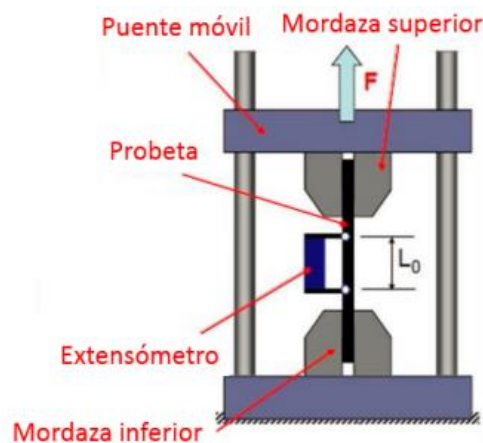


Figura 1. Esquema de una máquina que realiza ensayo de tracción [11].

En el tiempo que la probeta se va deformando de una longitud inicial L_0 y un área transversal A_0 , se registra la fuerza F y el desplazamiento Δl que es la diferencia entre la longitud final L_F y la inicial L_0 , hasta llegar a la fractura del material. Estas magnitudes

se convierten en tensión y deformación respectivamente, que se consiguen partiendo de las ecuaciones 1 y 2 [11].

$$(1) \quad \sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$(2) \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0}$$

Donde:

σ = Esfuerzo o Tensión

ε = Deformación

Por lo tanto, el ensayo de tracción proporciona un diagrama Esfuerzo o tensión vs Deformación. El diagrama de Esfuerzo-Deformación varía dependiendo del material que se utilice ya sea dúctil o frágil como se muestra en la Figura 2.

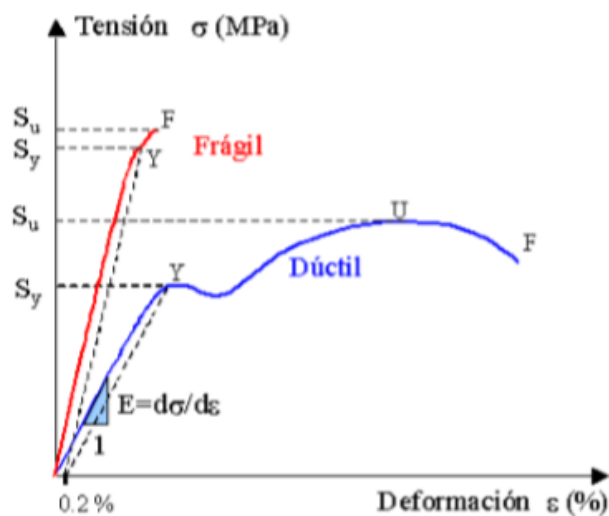


Figura 2. Representación del Diagrama Esfuerzo-Deformación de un material frágil y otro dúctil [9]

El diagrama Esfuerzo-Deformación depende de variables que forman parte del ensayo como son: velocidad de aplicación de carga, temperatura, máquina utilizada, entre otros, por lo tanto, es de mucha importancia realizar los ensayos basándose en Normas y utilizando máquinas estandarizadas para poder controlar estas variables [10].

Para poder interpretar los resultados que se obtienen de un ensayo de tracción es necesario entender el diagrama de Esfuerzo- Deformación ya que este se conforma de zonas donde la probeta se comporta de diferente manera hasta llegar a la rotura.

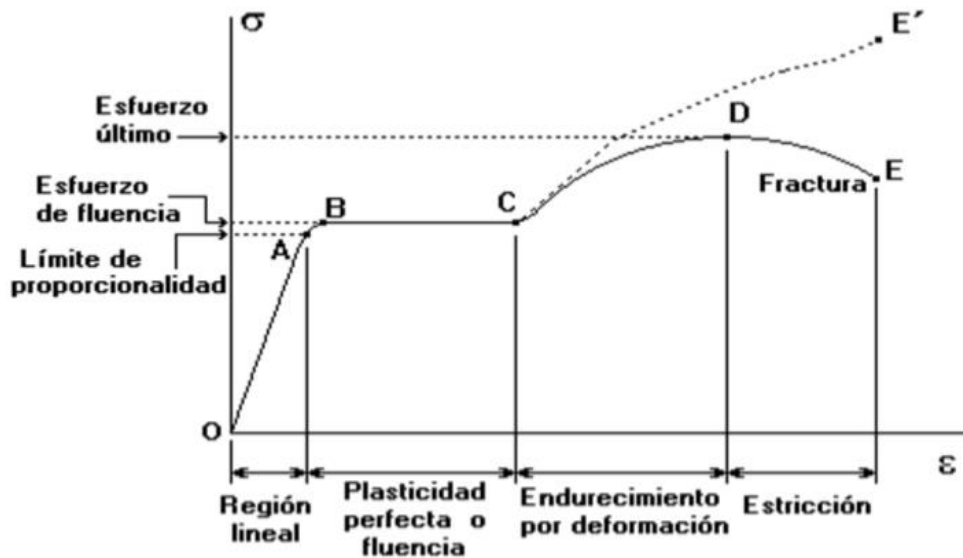


Figura 3. Diagrama Esfuerzo-Deformación [12].

En la Figura 3 se puede observar los diferentes tramos que forman el diagrama Esfuerzo-Deformación donde:

- La región lineal representa la zona elástica, zona donde las deformaciones son de magnitudes pequeñas y se distribuyen a lo largo de la probeta, es la zona donde la probeta puede volver a su estado inicial si es que la carga se retira. El material cumple con la relación entre la tensión y la deformación para obtener el esfuerzo denominado límite de proporcionalidad (*Punto A*) o también llamado Módulo de Young; la ley de Hooke ayuda a encontrar este valor mediante la ecuación 3:

$$(3) \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- El final de la zona elástica viene dado por el límite elástico, que se define como la tensión a la cual las deformaciones ya no dejan regresar a la probeta a su estado inicial es decir se vuelven irreversibles [13].

- La región de plasticidad perfecta o fluencia es aquella donde debido a una reordenación cristalina la probeta sufre un incremento en la deformación sin aumentar la carga. El esfuerzo en esta zona en el *Punto B* se denomina esfuerzo de fluencia y hasta el *Punto C* el material se vuelve perfectamente plástico [11], [12].
- La zona de endurecimiento por deformación hace que el material se comporte de manera diferente es decir mostrando una resistencia a futuras deformaciones, por lo que es necesario aumentar la carga y el diagrama toma su forma desde el *punto C* hasta el *punto D* inclusive es aquí en el *punto D* donde se alcanza el esfuerzo denominado tensión máxima o esfuerzo último a la tracción, luego la carga se va reduciendo y se llega a la fractura en el *punto E* [10], [13].
- La zona de estricción corresponde a la disminución del área de la sección transversal de la probeta, si se usara esta área para calcular los esfuerzos la curva se comportaría de otro modo desde *C hasta E'* [10], [12].

Luego de analizar en que consiste el ensayo de tracción, se muestran los resultados obtenidos en otras investigaciones, exponiendo sus resultados conseguidos mediante los ensayos realizados y los parámetros que se estudiaron.

Así, Ruiz Domínguez et al. (2019) en su investigación acerca de los parámetros de impresión, obtiene resultados que se presenta en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Parámetros de impresión de Ruiz Domínguez et al. (2019)

Parámetro	Descripción
Material	ABS
Filamento	1,75 mm
Relleno	100%
Patrón de relleno	Offset
Espacio entre capas	0 mm
Espesor de capa	0,25
Temperatura de boquilla	225°C

Fuente: [14].

Tabla 2. Resultados de ensayo de tracción obtenidos en Ruiz Domínguez et al. (2019)

Norma	Nº de probetas	Esfuerzo máximo a la tracción (MPa)	Deformación (%)
ASTM D638	45 probetas ensayadas	37, 10 – 41,43	4,24 – 5,82

Debido a la cantidad de (45) probetas que se analiza en la Tabla 2 se coloca los rangos de esfuerzo máximo y deformaciones, y en la Figura 4 se muestra el diagrama de cómo se aplica la carga a una probeta hasta llegar a la rotura.

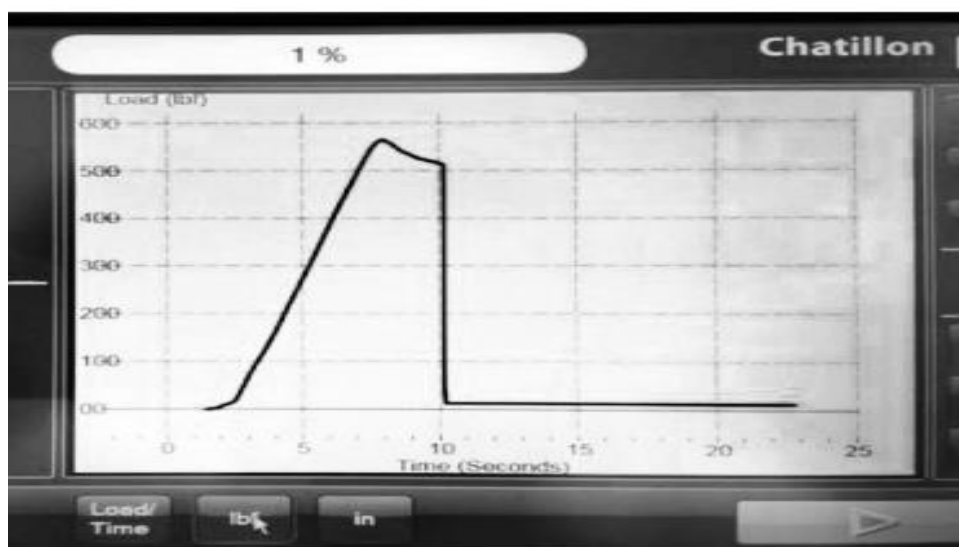


Figura 4. Diagrama de aplicación de carga a una probeta [14].

En su trabajo, Caminero et al. (2019), los parámetros de impresión y los valores de esfuerzo máximo a tracción y módulo de elasticidad se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros y resultados de ensayos de tracción en investigación Caminero et al. (2019).

Material	Espesor de capa (mm)	Orientación	Esfuerzo máximo a tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
PLA	0,18	Vertical	41,1	3726,7
PLA	0,18	Canto	64,9	4004,3
PLA	0,18	En el plano	72,3	4017,3
PLA	0,24	Vertical	40,5	3451
PLA	0,24	Canto	78,1	4025,5
PLA	0,24	En el plano	72,3	3769,9
ABS	0,18	Vertical	21	1931
ABS	0,18	Canto	38,5	2417
ABS	0,18	En el plano	26,4	1541,7
ABS	0,24	Vertical	21,9	1999,5
ABS	0,24	Canto	39,4	2373
ABS	0,24	En el plano	26,9	1557,5

Hou et al. (2018), analiza cómo influye la velocidad de extrusión en las propiedades mecánicas en ensayos de tracción, como se muestra en la Tabla 4. Además la Figura 5 y Figura 6 muestra los diagramas que se obtuvo en los resultados de su investigación.

Tabla 4. Parámetros de impresión y resultados de ensayo de tracción Hou et al. (2018).

Nº	Valor de flujo	Valor de velocidad de extrusión (mm/s)	Esfuerzo máximo a la tracción (MPa)	Nº	Valor de flujo (%)	Valor de velocidad de extrusión (mm/s)	Esfuerzo máximo a la tracción (MPa)
1	80	40	22,47	13	120	40	50,98
2	80	60	21,19	14	120	60	51,28
3	80	80	21,55	15	120	80	52,91
4	80	100	21,32	16	120	100	51,36
5	80	120	22,1	17	120	120	52,03
6	80	140	21,25	18	120	140	52,37
7	100	40	40,40	19	140	40	49,05
8	100	60	42,31	20	140	60	52,31
9	100	80	38,68	21	140	80	51,64
10	100	100	35,1	22	140	100	50,95
11	100	120	34,33	23	140	120	51,52
12	100	140	37,4	24	140	140	50,58

La mayor resistencia de tracción de 52,91 MPa se consigue con un valor de flujo de 120% y una velocidad de extrusión de 80 mm/s.

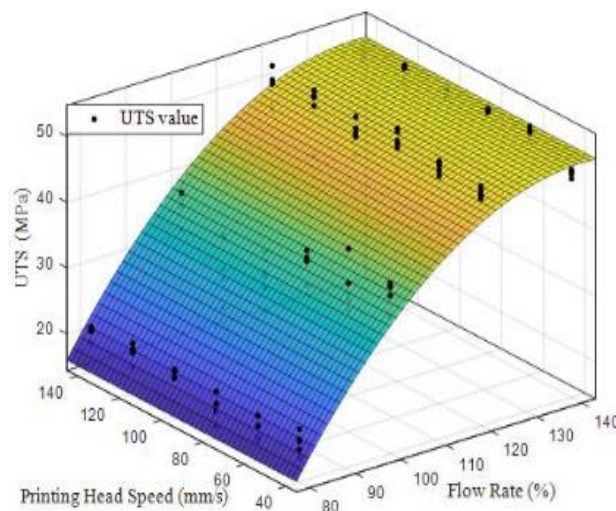


Figura 5. Diagrama 3D de resultados obtenidos en [5].

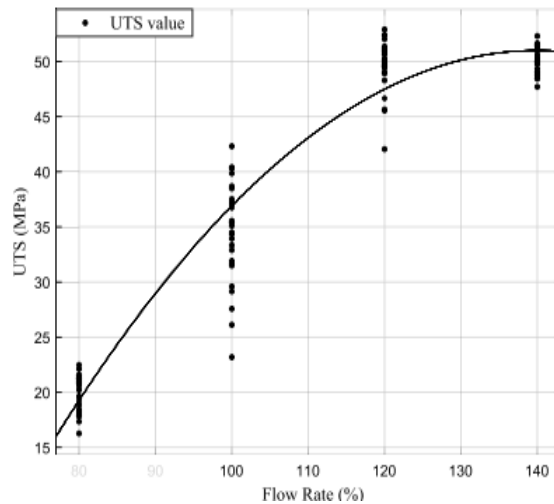


Figura 6. Vista lateral del diagrama 3D [5].

1.1.2 Ensayo de Flexión.

El ensayo de flexión permite determinar las propiedades mecánicas respecto a los esfuerzos y flechas en los puntos de esfuerzo máximo y de rotura tomando en cuenta diferentes variables del ensayo [16]. El ensayo de flexión consiste en someter una probeta ya estandarizada a un esfuerzo de flexión que aumenta hasta que se produzca una fractura y así obtener la información sobre el material. Existen dos tipos de ensayos a flexión donde se diferencian dependiendo de los apoyos que tenga la probeta como se muestra en la Figura 7, la flexión en 3 puntos se refiere a la aplicación de una carga en el punto central de la probeta y dos apoyos en los extremos, la flexión en 4 puntos cuando se aplica carga en dos puntos y también se tiene dos puntos de apoyo en la probeta [11].

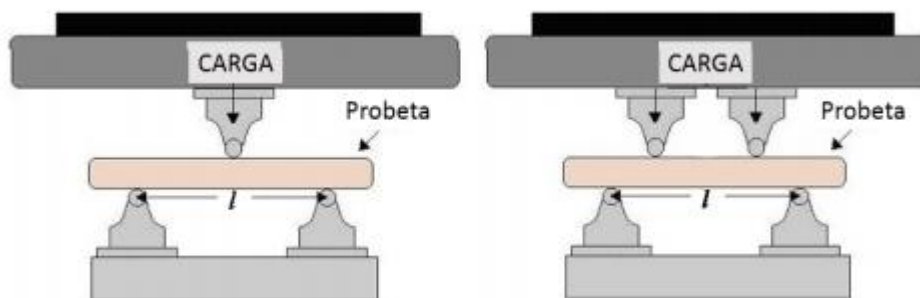


Figura 7. Configuración del ensayo de flexión a tres puntos (Izquierda) y configuración del ensayo de flexión a cuatro puntos (Derecha) [11].

En el ensayo de flexión la parte superior de la probeta está sujeta a compresión, y la parte inferior de la probeta está sujeta a tracción, esto se relaciona con la ley de Hooke ya mencionada en el ensayo de tracción. El ensayo de tracción también aporta con el diagrama Esfuerzo-Deformación que puede tener diferentes comportamientos como se muestra en la Figura 8.

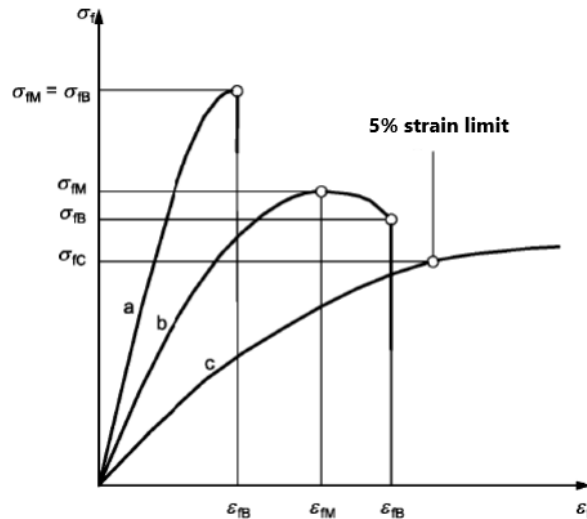


Figura 8. Curvas típicas del Esfuerzo-Deformación para ensayo de flexión.

En la Figura 8 se muestran 3 tipos de curvas de los resultados característicos del ensayo de flexión [11]:

- La curva **a** es típica del espécimen que rompe antes de la fluencia
- La curva **b** es cuando el espécimen muestra un máximo y rompe antes del límite de deformación al 5% o de la flecha convencional.
- La curva **c** es típica de espécimen que no cede y no rompe antes del límite de deformación del 5%.

Cuando el ensayo es a tres puntos se debe aplicar la siguiente ecuación para encontrar la resistencia a la flexión.

$$(4) \quad \sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

σ_f = Resistencia a la flexión en el punto medio del espécimen

P = Carga en el punto medio

L = Distancia entre los soportes

b = Ancho de la probeta

d = Espesor de la probeta

En el caso de que la probeta tenga una longitud 16 veces mayor al espesor, se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$(5) \quad \sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \left[1 + 6 \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 4 \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \right]$$

Donde:

D = Deflexión de la línea de centros de la probeta y la línea centro de distancia entre soportes

Para calcular la deformación de flexión se utiliza la siguiente ecuación:

$$(6) \quad \varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

Donde:

ε_f = Deformación de Flexión

D = Deflexión máxima en el centro de la viga

L = Distancia entre soportes

d = Espesor de la probeta

Finalmente, el cálculo del módulo de elasticidad se lo realiza con la siguiente expresión:

$$(7) \quad E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$

Donde:

E_B = Módulo de elasticidad a la Flexión

m = Pendiente de la tangente inicial de la curva Carga-Deflexión

La pendiente de la tangente inicial puede calcularse de la siguiente manera:

$$(8) \quad m = \frac{\Delta P}{\Delta y}$$

Donde:

ΔP = Variación de carga en los puntos de análisis

Δy = Variación de la deflexión en los puntos de análisis

Al igual que en los ensayos de tracción, a continuación, se muestra los resultados obtenidos en otras investigaciones, resaltando los datos obtenidos de los ensayos realizados y los parámetros que se estudiaron.

Tabla 5. Resultados de ensayo de flexión de Caminero et al. (2019).

Espesor de capa (mm)	Orientación	Esfuerzo máximo a la flexión (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
PLA			
0,18	Vertical	29,9	1402
0,18	Canto	62	1447
0,18	En el plano	53,4	1550
0,24	Vertical	31	1339
0,24	Canto	61,7	1717,6
0,24	En el plano	46	1546,3
ABS			
0,18	Vertical	19,5	642,6
0,18	Canto	33,4	961
0,18	En el plano	25,4	712,3
0,24	Vertical	18,6	648
0,24	Canto	30,9	883,6
0,24	En el plano	26,3	758,3

En la investigación de Caminero et al. (2019), también se realiza ensayos a flexión para saber cómo influye los parámetros estudiados en las características mecánicas como se muestra en Tabla 5.

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos de Molina Osejos (2016), parámetros y características obtenidas.

Tabla 6. Resultados de ensayo de flexión de Molina Osejos (2016).

Configuración de patrón de relleno	Resistencia a la Fluencia (MPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Módulo de elasticidad
PLA			
Sólida	57	73,32	1112,6
Cuadrada	41,2	65,5	1120
Poligonal	40,1	61,78	1100
Diagonal	46,6	68,8	1230
Circular	44,2	67,9	1200
Romboidal	36,4	58,5	942
ABS			
Sólida	35,1	33,7	905
Cuadrada	30,7	31,3	788,4
Poligonal	28,6	29,6	801
Diagonal	27	29,3	798
Circular	28,9	31,5	818
Romboidal	22,5	27,5	610

En la Figura 9, se resumen los resultados obtenidos para la resistencia del ABS, y en la Figura 10, la resistencia del PLA.

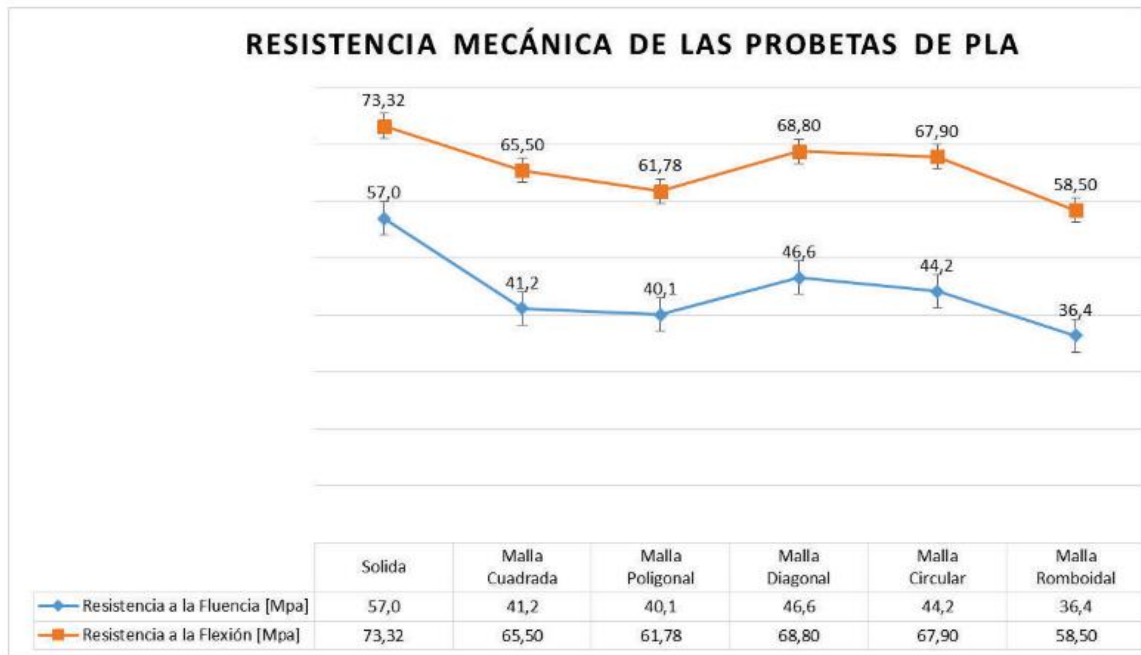


Figura 9. Resistencia mecánica en probetas ensayadas de PLA impreso para diferentes configuraciones de relleno [17].

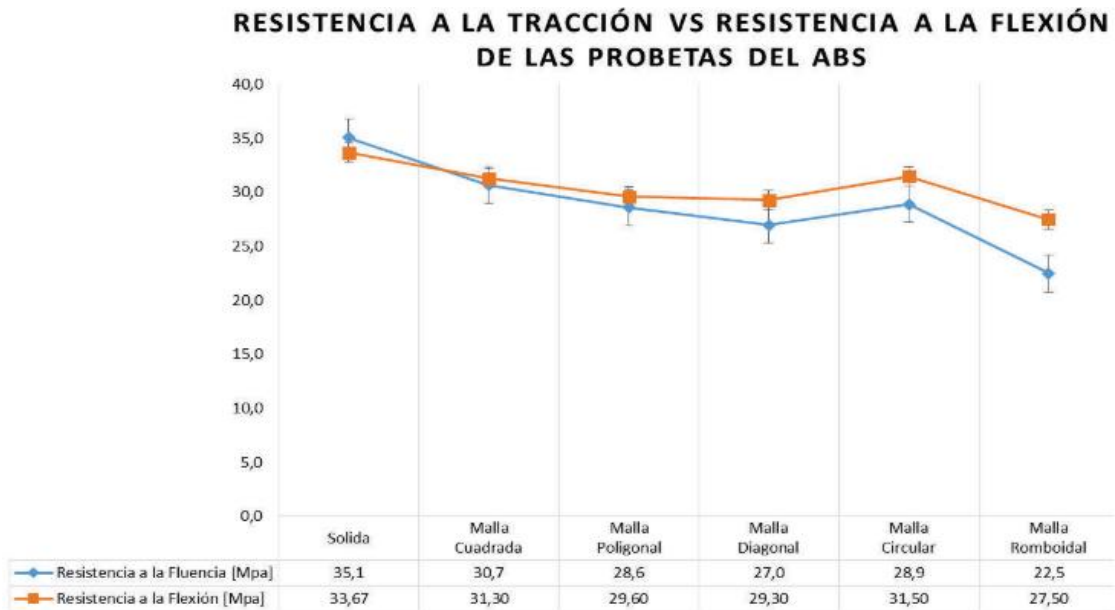


Figura 10. Resistencia mecánica a la tracción y a la flexión de ABS [17].

Finalmente en el trabajo de Shabana et al.(2019) analiza el ABS, PLA y una combinación tipo sándwich entre el PLA y ABS.

Tabla 7. Resultados de ensayo de flexión de Shabana et al.(2019).

Material	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Deformación al máximo esfuerzo de flexión	(mm)
ABS	84,98737	47,22	0,0334	8,87735
PLA	32,17682	17,88	0,06392	4,63891
PLA y ABS	34,34876	19,08	0,06859	9,52694

Los resultados que se muestran en la Tabla 7 revelan que la combinación entre PLA y ABS tienen resistencia muy similar a la que se obtiene solamente con el PLA, pero mostrando una mejora en la resistencia de flexión.

1.1.3 Ensayo de Compresión.

El ensayo de compresión consiste en aplicar una carga axial negativa que tiende a causar reducción del volumen del espécimen, tiene similitudes con el ensayo de tracción en el procedimiento y en el análisis de los resultados [9], [12].

El diagrama Esfuerzo-Deformación en compresión se comporta similar al de tracción, los materiales frágiles y algunos dúctiles llegan al punto de fractura aplicando una carga de compresión, pero muchos materiales dúctiles y polímeros no llegan al punto de fractura, sino que el espécimen se deforma hasta llegar a obtener un diámetro grande con espesor muy delgado, donde la carga que se necesitaría es demasiado alta, por lo tanto, el ensayo ya no puede continuar [12].

1.1.4 Ensayo de Impacto.

El ensayo de Impacto por péndulo ayuda a determinar la tenacidad de cada espécimen sometido a ensayo, se lo realiza con el método Charpy o el método Izod, en general los dos consisten en soltar desde una altura determinada un péndulo que impacte la superficie de prueba para determinar la curva del material [18].

Para determinar la velocidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$(9) \quad v = \sqrt{2gh}$$

Donde:

V = Velocidad del percutor al momento del impacto

g = Gravedad

h = Altura de caída del péndulo

Para la obtención del valor de energía absorbida por la probeta se hace un análisis físico con respecto al péndulo.

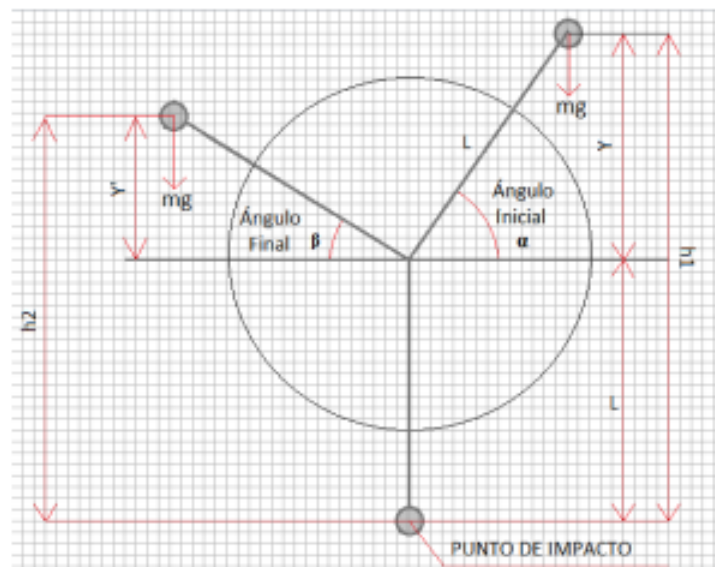


Figura 11. Elementos en el análisis físico del péndulo de impacto [19].

De la Figura 11 se diferencia los siguientes elementos:

α = Ángulo de elevación inicial del péndulo

β = Ángulo de elevación final del péndulo después del impacto

$h1$ = Altura inicial del péndulo

$h2$ = Altura final del péndulo después de impacto

L = Longitud del péndulo

Partiendo de los elementos físicos mencionados se calcula la energía al impacto con la siguiente ecuación:

$$(10) \quad E_{abs} = (\sin \alpha - \cos \beta)MgL$$

Donde:

E_{abs} = Energía absorbida por la probeta

M = Masa del conjunto: péndulo y martillo

Los ensayos de tracción, flexión, compresión e impacto son los métodos de caracterización que se pueden realizar para obtener las características mecánicas de un material. Aunque existen otros métodos para poder encontrar características mecánicas, con estos ensayos se obtienen las principales propiedades.

1.2 Fabricación Aditiva

La definición de fabricación aditiva que otorga la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) es: “Proceso de unión de materiales capa a capa para hacer objetos modelados en 3D, en oposición a las metodologías de fabricación sustractivas, tales como el mecanizado tradicional” [17].

La fabricación Aditiva es un método que abarca diferentes tecnologías con un factor en común que es la adición de material para lograr una pieza final, pero la fabricación aditiva utiliza varios materiales y métodos de fabricación, por lo cual, es de mucha importancia saber las diferencias que existe entre ellos [1]. Entre las tecnologías de fabricación aditiva, la impresión 3D es la más utilizada en el prototipado de piezas mecánicas [4].

1.2.1 Características de la fabricación aditiva.

Las principales características de la fabricación aditiva son las siguientes [4], [20]:

- Su tiempo de fabricación se reduce en comparación a otros procesos que necesitan herramientas de corte
- No es necesario utilizar herramientas de corte por lo que el tiempo de fabricación se reduce en un gran porcentaje
- En su totalidad los procesos AM son automatizados
- Ciertos procesos AM constan de la habilidad de poder utilizar varios materiales y así conseguir que una sola pieza conste de 1 o más materiales

- Se puede obtener piezas o prototipos con geometrías difíciles de conseguir utilizando otros procesos de fabricación gracias a que la fabricación aditiva permite avanzar capa por capa
- Los componentes realizados por procesos de AM constan con propiedades anisotrópicas
- La fabricación de piezas puede obtenerse a partir de un modelo CAD, que permite reducir etapas o procesos para obtener una pieza final, a diferencia de los procesos sustractivos tradicionales

1.2.2 Ventajas de la Fabricación Aditiva.

Gracias a la versatilidad y los distintos tipos de procesos de fabricación aditiva tiene las siguientes ventajas sobre otros procesos ya convencionales [20], [17], [21], [22] y [23]:

- ✓ Permite reducir los lotes de fabricación, logrando así una serie unitaria sin involucrar costes extras de fabricación
- ✓ No es necesario realizar acciones previas a la fabricación y tampoco utilizar sujeciones complejas, es decir se usan utensilios extras, lo que es una gran ventaja sobre los procesos de fabricación sustractivos
- ✓ Por ser una técnica de producción nueva, permite acceder a nuevos campos de mercado
- ✓ Posibilita la reducción de peso y así obtener productos más ligeros
- ✓ Se reduce costos ya que se disminuyen procesos de producción adicionales
- ✓ Libertad en el diseño y la personalización para las Masas
- ✓ Ayuda a la producción directa y flexible sin herramientas ni Moldes en especial en el uso de la impresión 3D

- ✓ Logra disminuir desechos debido a que se utiliza solo el material necesario y así se reduce la cantidad de material que se desperdicia.
- ✓ Los diseñadores industriales pueden construir prototipos de los objetos industriales en un tiempo menor y disminuyendo su costo considerablemente

1.2.3 Desventajas de la Fabricación Aditiva.

La Fabricación Aditiva a pesar de ser una tecnología con muchas cualidades también presenta limitaciones las cuales son de mucha importancia conocerlas para saber que es posible y que no es posible realizar mediante esta parcialmente nueva tecnología de fabricación:

1.2.3.1 *Material.*

La fabricación aditiva, al ser una nueva tecnología de fabricación no tiene tanta gama de materiales como lo tienen los métodos sustractivos, que permite manufacturar objetos con materiales poliméricos, metálicos, vidrio, o compuestos; siendo los polímeros que en su mayor parte se utilizan, el uso de metales es más complicado y muy costoso en ciertas técnicas de fabricación aditiva, por lo tanto, el problema de disponibilidad y coste de la materia prima son limitantes muy importantes que se deben tomar en consideración [20], [24], [25]. En la Figura 12 se muestra, en la izquierda un rotor en plástico y a la derecha en metal.

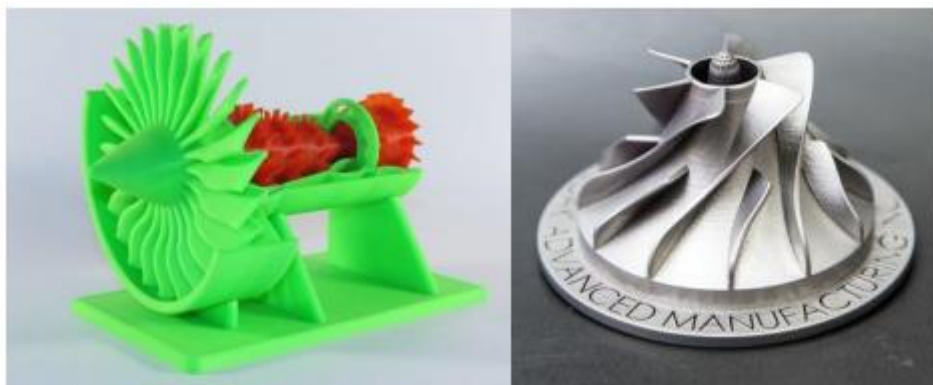


Figura 12. Rotores realizados mediante Fabricación Aditiva [24].

Dentro de los materiales poliméricos se utiliza el PLA, el ABS, poliestireno de alto impacto, Ultem, polipropileno y las mezclas de dos o más termoplásticos [26].

1.2.3.2 *Acabado y velocidad de fabricación.*

El acabado y velocidad de fabricación son parámetros dependientes entre sí, en especial cuando se incrementa la velocidad influye mucho en el acabado superficial. El espesor de la capa también es un parámetro que influye en el acabado, esto se ve limitado por el tipo de máquina que se utilice y a su vez el tiempo de fabricación, lo cual implica, que mientras menor sea el espesor de la capa mayor será el tiempo de fabricación [20], [17].

1.2.3.3 *Repetibilidad.*

Cuando se necesita que varias piezas con la misma geometría tengan una estabilidad dimensional entre ellas, entonces, se presentan problemas en algunos métodos de fabricación aditiva porque al fabricar una pieza y luego otra similar entre ellas presentan variaciones en sus medidas. En unos casos este efecto se origina por los efectos térmicos en las piezas producto del enfriamiento del material lo que ocasiona contracciones que varíen las propiedades geométricas de la pieza [20].

1.2.3.4 *Tamaño.*

Actualmente el volumen que pueden alcanzar las piezas que se fabrican con procesos AM es limitado, aunque actualmente existen mejoras, aun es una desventaja. Para algunos materiales, el volumen está relacionado con el tipo de material que se utilice, así, en el caso de plásticos se puede trabajar con dimensiones de hasta 2 metros y en el caso de metal, la longitud puede alcanzar hasta 500mm [20], [25].

En la Figura 13 se muestra la capacidad volumétrica de una impresora 3D especializada en el campo industrial.



Figura 13. Impresora Box BLB Industries con volumen de impresión de 1500 x 1100 x 1500mm [27].

1.2.4 Métodos de Fabricación Aditiva.

1.2.4.1 Estereolitografía (SLA).

La estereolitografía o *Estereolithography*, SLA es la tecnología de fabricación aditiva más antigua, y en la actualidad es la más avanzada, así empezó las bases para este nuevo tipo de tecnología que se basa en la adición de material capa por capa [20]. La estereolitografía fue creada en 1983 por el norteamericano Charles Hull, que luego será el cofundador de una de las empresas más importantes en el ámbito de la fabricación aditiva 3D Systems [28].

La estereolitografía es un procedimiento en el cual se solidifica una resina foto curable, comúnmente epóxica o acrílica en estado líquido mediante la acción de un láser ultravioleta, el cual dibuja una sección transversal sobre la superficie del tanque de resina, solidificando así la primera capa. Posteriormente, el elevador baja el espesor indicado por la sección especificada y se repite el proceso capa a capa, este proceso se denomina fotopolimerización. [1], [29].

En la Figura 14, se muestra un esquema estándar de este procedimiento, que consiste en una plataforma que se sumerge en un depósito de polímero líquido a una profundidad de 0,05 a 0,15 [mm] antes de ser impreso. El láser UV se refleja en la superficie del polímero líquido mediante un espejo que recorre la trayectoria del patrón de la sección

transversal, el cual, sigue el movimiento de la plataforma hacia abajo, a una profundidad entre los rangos establecidos, así, el proceso se repite capa por capa hasta lograr el objeto terminado.

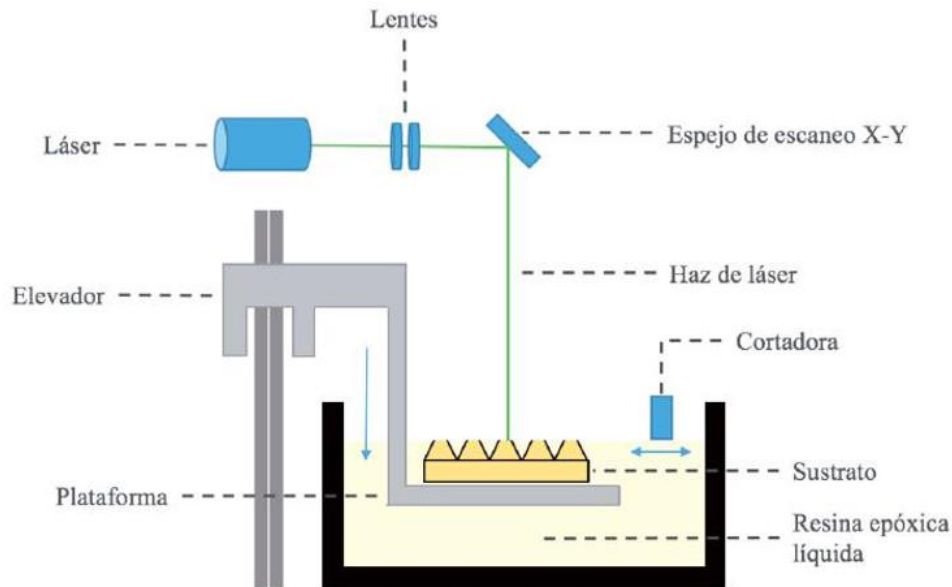


Figura 14 Esquema del método SLA [30].

En un sistema de fabricación aditiva por este método SLA, su principal ventaja frente a otros métodos de impresión 3D es la alta resolución que se obtiene en la pieza final, gracias al número de fotones aplicados que se utiliza para empezar la polimerización, se obtiene una resolución superior a los 100 micrones, lo cual, permite construir objetos muy sofisticados. Sin embargo, a pesar de que en este método no se tiene problemas de obstrucción o taponamiento de boquillas, su configuración es muy costoso, lo cual, es un obstáculo para las principales industrias dedicadas a la impresión 3D, pero se puede obtener piezas muy útiles y con una muy alta calidad como se muestra en la Figura 15 [29].

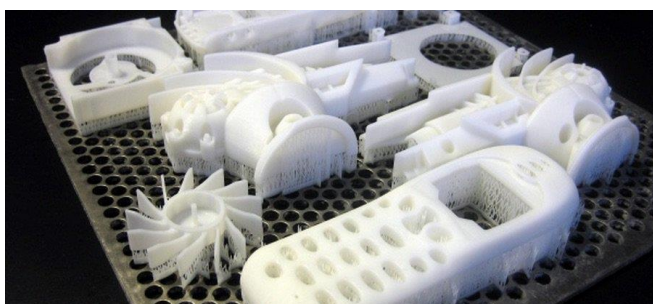


Figura 15. Prototipos realizados mediante Estereolitografía [31].

1.2.4.2 Procesamiento de luz digital (DLP)

El método de impresión 3D DLP (digital light processing) fue desarrollado por *Envisiontec* en el año 2003, como una técnica de polimerización similar al método SLA, ya que, en lugar de usar el rayo láser de escaneo para solidificar una capa de resina, se proyecta una máscara digital para crear el patrón (Figura 16). El tamaño de punto creado por el láser brinda la resolución a la técnica SLA mientras que la técnica DLP utiliza una imagen digital proyectada su resolución la define el tamaño del pixel gracias a esto DLP puede imprimir un objeto con menos tiempo en comparación con el SLA, ya que, cada capa está expuesta completamente por el patrón proyectado, lo cual, permite la impresión de varios objetos grandes y compactos con pocos detalles, caso contrario, se necesita una lente que proyecte la luz en cierta área de la plataforma de construcción para que no se pierda la resolución de la impresión. Mientras que en el sistema SLA, al ser escaneada meticulosamente por un láser (Figura 17) se puede conseguir una alta resolución y un mejor acabado superficial sin importar si el objeto tiene más detalles [29], [32].

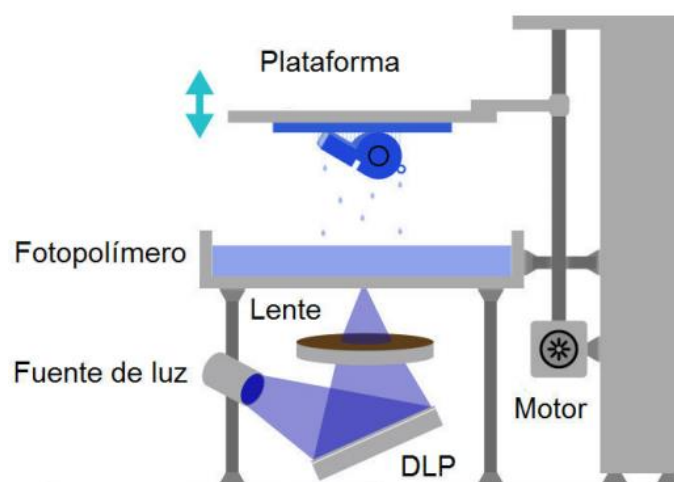


Figura 16. Esquema del método DLP [33].

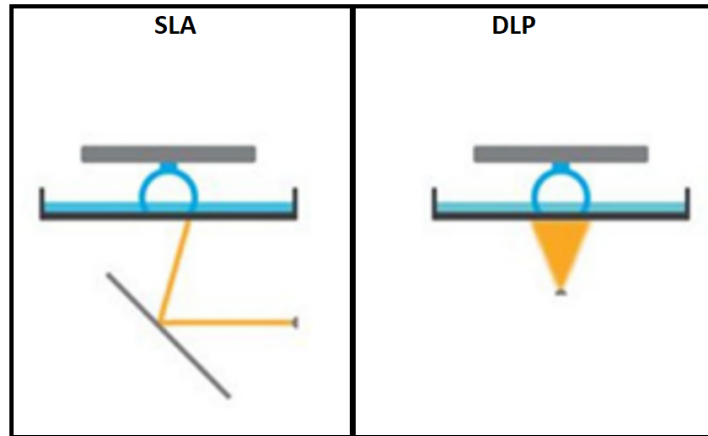


Figura 17. Exposición selectiva a la luz por un láser frente a un proyector [2].

Esta técnica DLP es muy precisa por lo tanto es muy utilizada en la joyería, construcción de juguetes y también en la medicina.

1.2.4.3 Sinterización selectiva por láser (SLS)

La sinterización selectiva por láser o *Selective layer sintering*, SLS es un procedimiento similar también al SLA teniendo como variante el tipo de material que se utiliza, debido a que en este proceso se utiliza un material en polvo, en lugar de un material líquido. El láser dibuja selectivamente una sección transversal del objeto sobre la capa de polvo, haciendo que la primera capa se sinterice (caliente y funda) creando una masa sólida, este proceso se repite con cada capa de polvo que se esparce hasta finalizar la pieza [1].

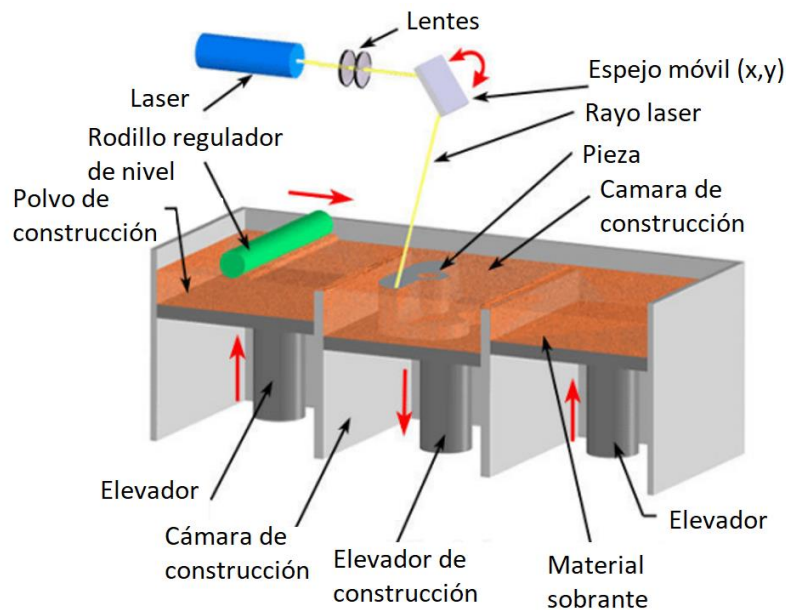


Figura 18. Esquema del método SLS [33].

Como se muestra en la Figura 18, una configuración SLS generalmente está compuesta por la cámara de reserva de polvo y la cámara de impresión. Ambas cámaras se calientan inicialmente hasta cierta temperatura justo por debajo del punto de fusión del material.

La cámara de impresión se desplaza hasta una profundidad predefinida (altura de capa) mientras que la cámara de reserva se mueve hacia arriba, exponiendo parte del polvo en el nivel de impresión. El tambor nivelador hace rodar los polvos desde la cámara de la reserva hasta la parte vacía de la cámara de impresión aplicando una capa fresca de polvo sobre la superficie de impresión y así es el proceso de impresión capa a capa hasta terminar la pieza [29].

Los factores que definen la calidad de una impresora SLS en polvo, el tamaño de las partículas, la potencia del láser, el espaciado de escaneo y la velocidad de escaneo. La principal ventaja de la sinterización selectiva por láser SLS es que no necesita un soporte estructural para lograr un buen acabado superficial ya que la torta en polvo actúa como soporte para el objeto impreso; logrando que los objetos más complicados se impriman con facilidad (Figura 19) [28].



Figura 19. Prototipos realizados con el método SLS [28].

1.2.4.4 Fabricación por corte y laminado (LOM)

La fabricación por corte y laminado (*Laminated object manufacturing, LOM*) fue de los primeros métodos de fabricación aditiva disponibles y se basa en el corte y laminado capa por capa de láminas o rollos de materiales, el proceso consiste en un cortador mecánico o láser que corta los contornos de la pieza sobre un papel de 0.1 mm de espesor, plástico o metal, después de esto los rodillos depositan una nueva capa de papel y se repite el proceso hasta terminar todas las capas (Figura 20). Una vez cortadas todas las capas, la impresora reúne todas las capas para aplicar presión sobre ellas y así fundirlas para formar un solo objeto sólido 3D [34], [32].

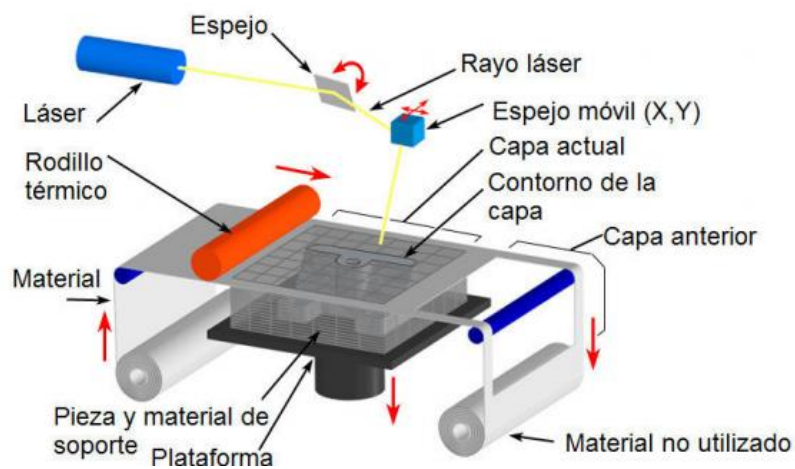


Figura 20. Esquema del método LOM [33].

Esta técnica LOM, se puede utilizar para una variedad de materiales, como compuestos de polímeros, cerámica, papel y cintas rellenas de metal. Asimismo, el procesamiento posterior, como el tratamiento a alta temperatura, puede ser necesario dependiendo del material y las propiedades que se quiera obtener. La fabricación aditiva ultrasónica (UAM) es una nueva subclase de LOM que combina la soldadura ultrasónica de costuras metálicas y el fresado CNC en el proceso de laminación. UAM es el único método de fabricación aditiva que es capaz de construir estructuras metálicas a baja temperatura [34].

Las piezas LOM basadas en papel tienen una gran similitud con la madera y, por lo tanto, son atractivas para aplicaciones de arquitectura, diseño de productos y medicina (Figura 21) [35].



Figura 21. Prototipos realizados mediante LOM [36], [35].

1.2.4.5 Tecnología PolyJet (PJ)

La tecnología Polyjet o Photopolymer Jetting(PJ) es una tecnología avanzada de manufactura aditiva, que permite crear objetos tridimensionales con alta definición, precisión y a su vez poder integrar diferentes materiales en una sola parte, pieza o sistema. Su proceso consiste en inyección de tinta en la que, las boquillas de impresión múltiples rocían con precisión pequeñas gotas de fotopolímero líquido u otros materiales líquidos, de ahí el nombre de Poly Jet [29], [28]. El fotopolímero líquido al igual que en la técnica de a estereolitografía se endurecen mediante luz ultravioleta [11].

En la Figura 22, se muestra el esquema de la tecnología PJ y en la Figura 23 se muestra una máquina que trabaja bajo esta tecnología.

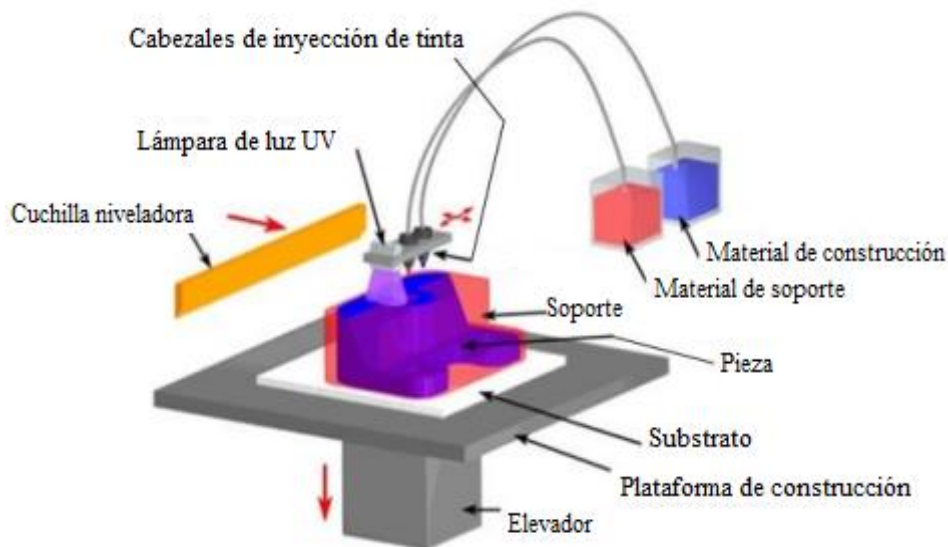


Figura 22. Esquema del proceso de fabricación Polyjet [13].

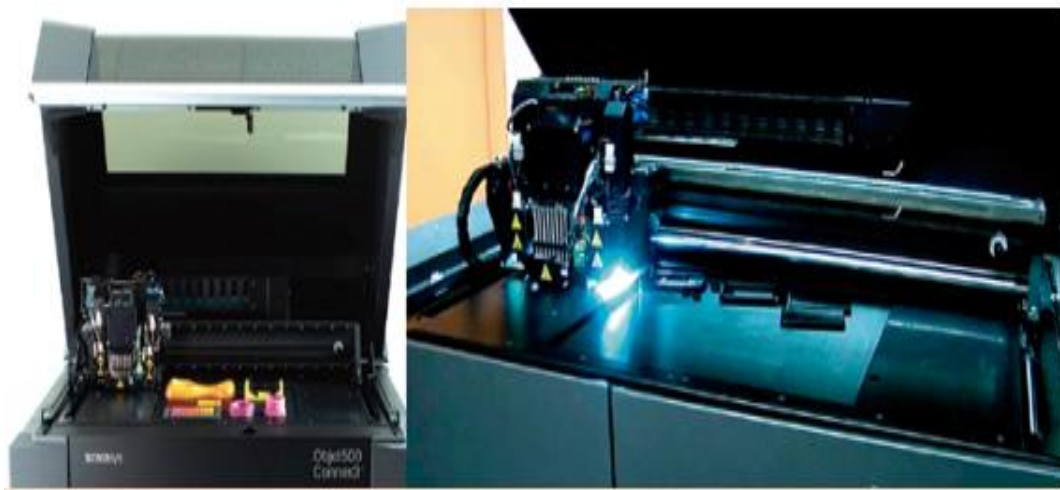


Figura 23. Máquina que funciona con Tecnología Polyjet, modelo Connex 500 de la empresa Stratasys [28].

1.2.4.6 Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Las impresoras 3D basadas en FDM son actualmente las impresoras 3D más populares para la impresión de materiales compuestos y polímeros que se basan en sistemas de fabricación aditiva (AM).

La impresión 3D se inicia en 1984 con Charles Hull, y fue el fundador de la empresa 3D Systems, donde se construyen una primera versión de impresora 3D que utiliza el

método de estereolitografía [18]. Posteriormente, Scott Crump crea el sistema FDM. Actualmente, la empresa *Stratasys* se dedica a la construcción, comercialización e innovación de impresoras 3D en Estados Unidos desde 1990 [37], llegando a implementar la impresión 3D de escritorio con la posibilidad de utilizar filamento de termoplásticos con temperaturas de fusión más altas, como PEEK [29].

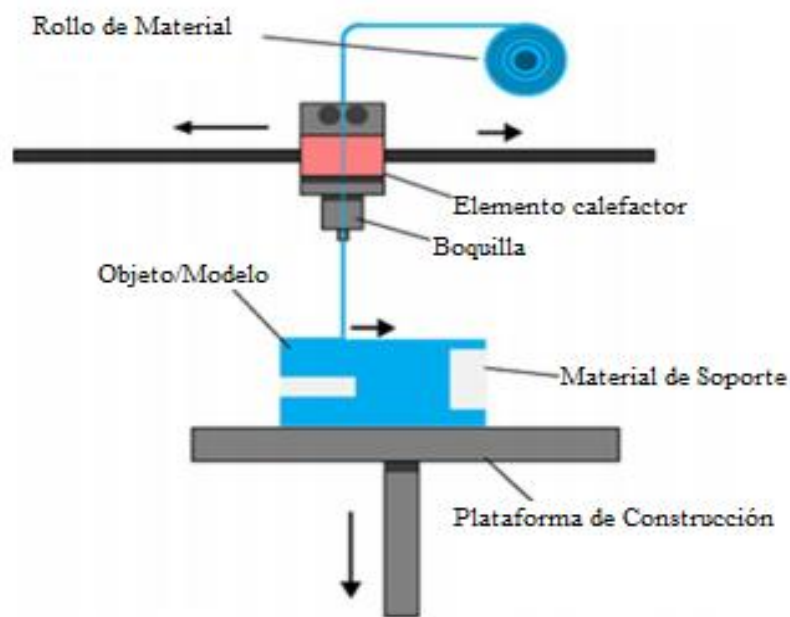


Figura 24. Esquema del método FDM [29]

Este proceso se fundamenta en la extrusión de un material y depositarlo en una plataforma que se solidifica instantáneamente, creando una capa bidimensional encima de otra [38], dando como resultado un objeto tridimensional tangible conforme al código G generado por el Software de interfaz que utilice la impresora 3D. En esta técnica de fusión de materiales se utiliza un carrete de filamento de termoplástico como PC, ABS y PLA con diámetros variables para ser fundido y extruido a través de una boquilla caliente (Figura 24) [39]. La calidad de la impresión y el rendimiento de las piezas o modelos construidos depende de las propiedades del material utilizado, y los parámetros de impresión, tales como: la orientación, grosor de la capa, ángulo de trama,

el ancho de trama, air gap o espacio de aire, densidad de relleno, patrón de relleno, velocidad y temperatura de impresión, entre otros [40].

En la Figura 25 se observa la estructura fundamental de la impresión 3D, la cual depende del material que se utilice, el software que maneja la impresora y la máquina de impresión que es la que limita aspectos primordiales en las piezas fabricadas como el acabado y la complejidad de las piezas a imprimir.

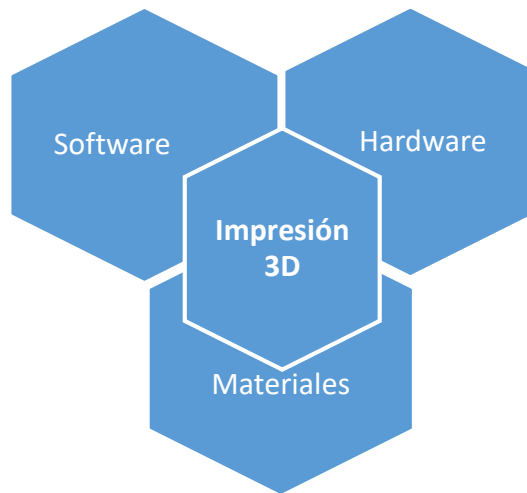


Figura 25. Aspectos principales del procedimiento en impresión 3D.

1.2.4.6.1 Impresión 3D (FDM) con múltiples materiales.

El crecimiento constante de esta tecnología ha conseguido desarrollar métodos innovadores como las técnicas de impresión de múltiples materiales (

Figura 26). Las técnicas de impresión de múltiples materiales es la tecnología en la cual la impresora 3D tiene varias boquillas por las que circulan diferentes filamentos con la posibilidad de manipular los parámetros de distintos materiales para realizar la optimización, aunque esto parezca una mejora muy simple que permite realizar piezas con variedad de colores, estas mejoras también intervienen en las propiedades mecánicas del producto final [8], [41].

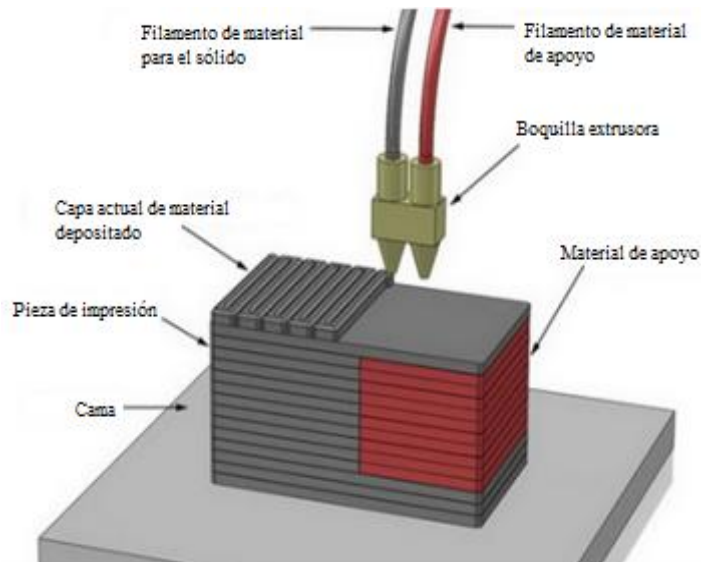


Figura 26. Esquema de la técnica de impresión de múltiples materiales [2].

1.2.4.6.2 Componentes y funcionamiento de una impresora 3D con tecnología FDM.

La impresión 3D por deposición fundida o FDM está constituida por una plataforma o base de impresión, en la cual se imprime la pieza, una bobina de filamento que sirve como material de impresión y una cabeza de extrusión o extrusor como se muestra en la Figura 27 [39].

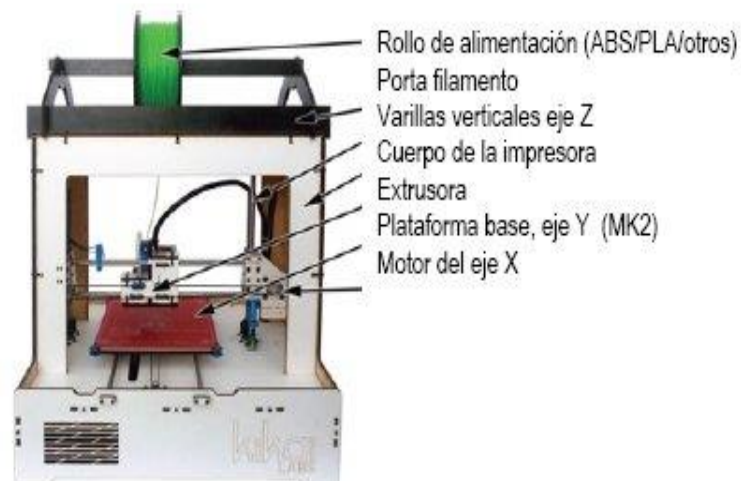


Figura 27. Partes fundamentales de una impresora 3D [25].

La impresión se la realiza mediante extrusión vertical del material por medio de la boquilla circular, con movimientos en XY libres y en Z con movimientos capa a capa

como se muestra en la Figura 28, la extrusión se obtiene calentando una boquilla y haciendo presión sobre el material de hilo semirrígido haciendo que a su paso por la boquilla se funda inmediatamente antes de salir del extrusor. Este proceso se lo realiza sobre una superficie plana, paralela al plano XY que se denomina base o plataforma de impresión, que dependiendo del material utilizado esta plataforma debe tener una temperatura menor al filamento semifundido y además se debe adherir a ella en las primeras capas para evitar mal formaciones de la pieza. Generalmente los movimientos en los ejes x, y, z se los realiza utilizando motores a paso o servomotores [42], [43].

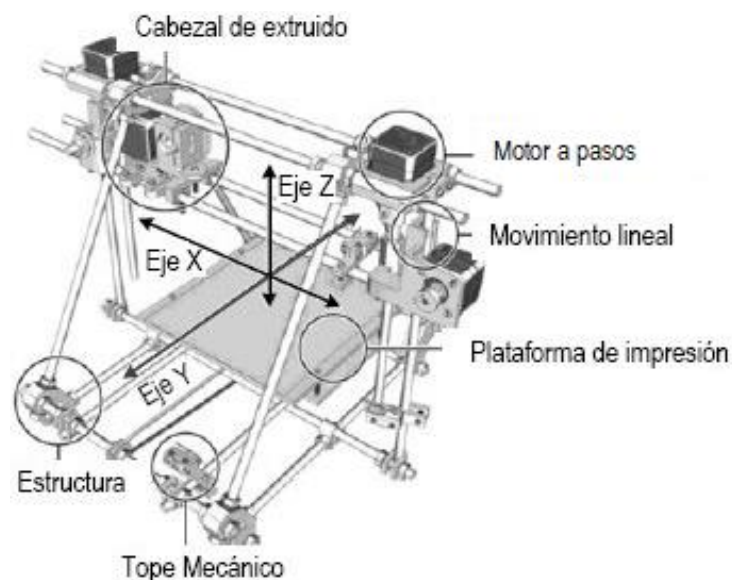


Figura 28. Partes mecánicas de una impresora 3D [25].

El cabezal de extrusión está constituido por los componentes que se muestran en la Figura 29 y se describen en la Tabla 8.

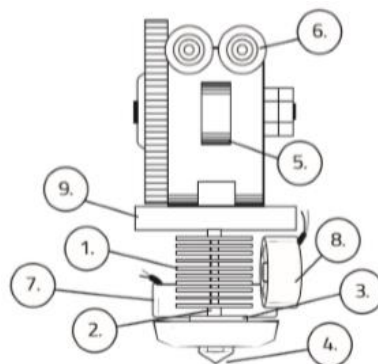


Figura 29. Esquema del cabezal de extrusión [10].

Tabla 8. Componentes del cabezal de extrusión [10].

Nº	Componente	Nº	Componente
1	Disipador de calor	6	Tornillo de apriete
2	Barrera térmica	7	Ventilador de capa
3	Bloque calefactor	8	Ventilador Hotend
4	Boquilla o Nozzle	9	Carro eje X
5	Balancín		

1.2.4.6.3 Materiales para impresión 3D.

La mayoría de las impresoras con tecnología FDM utilizan termoplástico, pero también existe la posibilidad de utilizar metales, que ya son características de algunas impresoras en la actualidad. Los principales polímeros son el ABS, PLA Y Nylon.

1.2.4.6.3.1 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El ABS es un polímero termoplástico que surge de la combinación de 3 monómeros lo que le convierte en un copolímero, cada monómero brinda características que hacen que el ABS tenga cualidades mecánicas y químicas. Los monómeros son: el acrilonitrilo que aporta la capacidad de resistir a altas temperaturas, resistencia química y brinda a la superficie más dureza, mientras el butadieno brinda fuerza y resistencia al impacto, finalmente el estireno contribuye procesabilidad y rigidez [43], [44], [10].

Debido a que el proceso de elaboración y fabricación del ABS es más complicado que el de otros plásticos también se lo conoce como plástico de ingeniería [17]. En la actualidad el ABS es utilizado por empresas dedicadas a la fabricación de piezas lego, carcasas de electrodomésticos, artículos de automóviles, y debido a su resistencia a altas temperaturas se lo utiliza en la fabricación de contenedores de líquidos calientes [43].

La industria LEGO al ser uno de los principales referentes de la utilización del ABS desde 1963, está tratando de cambiar el ABS por materiales ecológicos, invirtiendo una

gran suma de dinero para que con un nuevo plástico se sustituya progresivamente al ABS [45].

En el proceso de impresión del ABS, se debe considerar algunos factores [14], [46]:

- ✓ La temperatura de extrusión esta entre 225-260°C
- ✓ Se debe calentar la base de impresión entre 90 y 130°C
- ✓ Permite mecanizar las piezas impresas para darles un mejor acabado
- ✓ Reciclable

Es muy importante tomar en consideración, que el ABS produce gases contaminantes y perjudiciales para el ser humano especialmente cuando la impresión se la realiza en lugares confinados [14].



Figura 30. Spinners realizados en impresión 3D con ABS [47].

El warping es una de sus desventajas, ya que produce un pandeo debido a que no se adhiere bien el material a la cama de impresión, es decir, el material experimenta una contracción desde el centro hacia las fibras más externas del material impreso; este problema produce desgaste de material y más inversión de tiempo de impresión [48].

1.2.4.6.3.2 Ácido Poliláctico (PLA).

El PLA se obtiene de recursos naturales como maíz, trigo, raíces de tapioca, féculas y almidones de la caña de azúcar, por lo tanto, es un polímero biodegradable, en el cual,

está constituido por el ácido láctico (monómero) [43], [44], que tiene la siguiente forma molecular $(C_3H_4O_2)_n$, con propiedades mecánicas superiores en comparación con los plásticos que se obtienen del petróleo, y es un material muy amigable con el medio ambiente por su biocompatibilidad [17], [1].

El PLA se usa en muchas aplicaciones tanto de ingeniería, en la industria o en productos como: materiales de embalajes, envases desechables y moda [43].

El PLA es el material más usado en las impresoras 3D domésticas por presentar una facilidad para imprimir piezas de gran tamaño, por tener muy buena rigidez, facilidad a ser extruido, y no emite ningún tipo de gas contaminante al ser extruido.

Una desventaja que presenta el PLA es que las piezas y prototipos impresos que son expuestos a temperaturas mayores a $50^{\circ}C$ pueden presentar deformaciones [49].

En comparación con otros materiales el PLA tiene algunas ventajas [1]:

- ✓ Precio cómodo y competitivo
- ✓ Permite imprimir con buena calidad sin presencia de humedad e incluso sin necesidad de imprimirlo en una cama caliente, aunque es recomendable dependiendo del fabricante
- ✓ Puede ser tan duro como el PMMA o blando como el polietileno y flexible como un elastómero
- ✓ No requiere una temperatura tan elevada para su extrusión, la temperatura recomendada está entre 180 y $230^{\circ}C$ [33]

La principal desventaja es que su tratamiento posterior a la impresión es más complicado ya sea de pintura o mecanizado, puede producir warping durante el enfriamiento como se muestra en la Figura 31, pero es menos común que en el caso del ABS [48], [4].

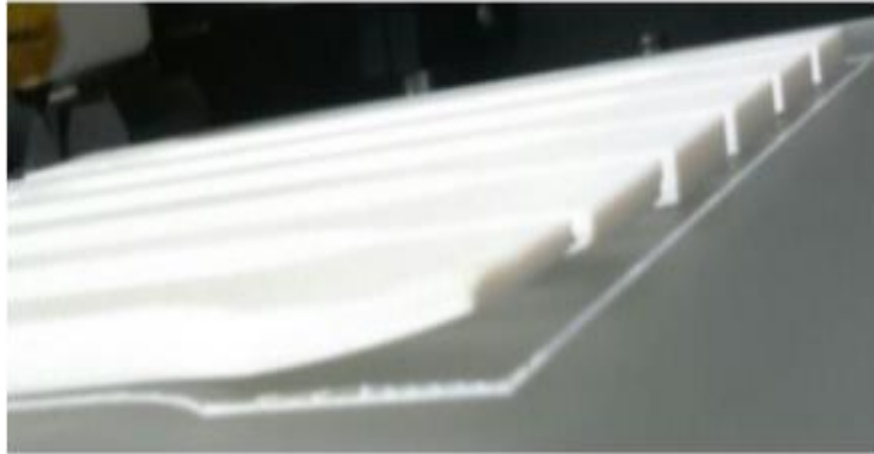


Figura 31. Presencia de warping [1]

Además, existen otros materiales en el campo de la impresión 3D, que poseen propiedades que son muy importantes dependiendo de su aplicación. En la Tabla 9 se hace una comparación entre algunos de ellos.

Tabla 9. Características de materiales utilizados en la impresión 3D con tecnología FDM



MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
HIPS [50]	<ul style="list-style-type: none"> -Temperatura de impresión entre 210 y 260°C -Posee resistente al calor, se puede lijar y pintar con acrílico -No necesita cama caliente -Reciclable -Resistente a ácidos
	<ul style="list-style-type: none"> -Temperatura de impresión: 207-235°C
PET (Tereftalato de polietileno) [9], [16]	<ul style="list-style-type: none"> -Temperatura de cama: 55°C -Densidad de 1,45 g/cm -Posee resistencia a impactos, químicos y fenómenos térmicos -No es biodegradable, pero si reciclable -Resistente al warping -Más Flexible que el PLA y más fácil de imprimir que el ABS
	

Figura 33. Material PET en la industria embotelladora [9].

MATERIAL

CARACTERÍSTICAS

TPE (Elastómero termoplástico) [33]



Figura 34. Estuche de móvil donde se aprecia la flexibilidad del TPE [33].

PVA (Acetato de Polivinilo) [46]



Figura 35. Fases del PVA utilizado como material de soporte [48].

PETG (PET y gicol) [48]



Figura 36. Botellas impresas en PETG [13].

NYLON [16]



Figura 37. Férula impresa en Nylon [46].

- Temperatura de impresión: 225-260°C
- No es necesario calentar la base de impresión
- Las marcas más conocidas son: Filaflex y Ninjaflex
- Alta flexibilidad e inodoro
- Diámetro del filamento constante durante la extrusión

- Fórmula: C₄H₆O₂
- Temperatura de impresión: 180-200 °C
- Temperatura de plataforma: 50°C
- Biodegradable
- Uso exclusivo de laca para mejorar adhesión
- Se disuelve en agua

- Temperatura de impresión: 220-250°C
- Temperatura de la cama: 60-90°C
- Recomendable utilizar un adhesivo para la primera capa
- Resistente al warping

- Temperatura de impresión: 240-260°C
 - Temperatura de la cama: 70-100°C
 - Dureza Alta
 - Flexibilidad Alta
 - Durabilidad Alta
 - Dificultad de uso medio
-

MATERIAL**CARACTERÍSTICAS**

PC (Policarbonato) [16]

Figura 38. Molde para fabricación de botellas impreso en Policarbonato [33].

Fibras de carbono [47]

Figura 39. Piezas fabricadas en fibra de carbono [33].

Termoplásticos de alto rendimiento [47]

Figura 40. Diseños de termoplásticos de alto rendimiento [47].

-Temperatura de impresión: 270-310°C

-Temperatura de cama: 90-110°C

-Dureza Alta

-Flexibilidad Media

-Durabilidad muy Alta

-Dificultad de uso medio

-Sirven para mejorar propiedades mecánicas de materiales como ABS, PETG, NYLON, ABS, o Policarbonato

-Brinda una mejor resistencia

-No influye considerablemente en el peso de las piezas fabricadas

-Puede ocasionar obstrucción en las boquillas de impresión

-Los más usados son: PEEK, PEKK, ULTEM

-Temperatura de impresión: 350°C

-Temperatura de la cama: 230°C mínimo

-Son muy fuertes y mucho más ligeros que algunos metales.

-Resistencia mecánica y térmica muy alta

-Su principal aplicación es el campo aeroespacial, automotriz y médico

MATERIAL

CARACTERÍSTICAS

Materiales Híbridos [33], [47]



Figura 41. Filamentos de PLA-Madera y PLA-Cobre [33].

- Compuestos por PLA y otro material
- Su objetivo es mejorar características mecánicas y también mejorar la calidad de las piezas
- Se combina PLA con fibras de madera o con polvos de metal como cobre, bronce y plata

Acero inoxidable [18]



Figura 42. Bicicleta impresa en 3D [18].

- Alta resistencia
- Larga vida útil
- Utilizado principalmente en la industria aeroespacial

Titanio [18]



Figura 43. Impresión de esternón para implante [18].

- Resistente
- Livianos y gran durabilidad
- Aplicación en la medicina

ORO [18]



Figura 44. Anillo realizado en ORO mediante impresión 3D [18].

- Altos acabados estéticos
 - Alta calidad
 - Se utiliza principalmente para elaborar joyas y bisutería
-

En la Tabla 10 se muestra las propiedades mecánicas para los diferentes materiales de impresión 3D.

Tabla 10. Propiedades mecánicas de materiales para la impresión 3D [13]

Propiedad	ABS	PLA	PET	PC	NYLON
Resistencia a la tracción (MPa)	2,1 – 2,4	2,4	2,8 – 3,1	2,3 – 2,4	2,6 - 3
Módulo de tracción (GPa)	41 – 45	46	59 – 72	55-75	78
Resistencia al impacto Izod (J/m)	200 – 400	500	100 – 450	600-850	30-250
Densidad	1,07	1,25	1,34 – 1,39	1,20	1,13
Resistencia a los rayos UV	Baja	Buena	Sufre decoloración	Reducida	Mala

Los valores que se representan tabulados pueden variar dependiendo de la marca del filamento, del color material, y también con respecto a la realización de los ensayos mecánicos.

1.2.5 Espesor de capa.

El espesor de capa influye en el número de capas y el acabado superficial de la pieza (Figura 45), esto se debe tomar en consideración cuando la pieza es de gran tamaño y el acabado superficial es muy importante, así, si se utiliza un espesor elevado se tiene un mal acabado superficial, si se usa un espesor menor se garantiza un mejor acabado pero esto influye directamente en el tiempo de impresión, sin embargo, a mayor espesor por capa mayor será el tiempo de impresión [48], [2].



Figura 45. Prototipos con diferente espesor de capa [42].

1.2.6 Air Gap.

El espacio entre dos filamentos contiguos se define como air gap (Figura 46). El air gap es positivo cuando dos filamentos consecutivos no tienen contacto, sin embargo, si la distancia entre centros es menor que el ancho de filamento, este valor es negativo. Un air gap negativo contribuye a una mayor resistencia a tracción de las piezas, ya que se rellenan los huecos vacíos entre filamentos, aumentando la densidad, y por tanto aumentando la resistencia de las uniones. Sin embargo, puede aparecer un exceso de material, que lleva consigo un mal acabado, o incluso que los filamentos contiguos presenten deformaciones [1].



Figura 46. Contacto entre filamentos [1].

1.2.7 Densidad de relleno

El relleno o infill, es la parte interior de la pieza impresa que permite escoger la configuración de piezas, ya sean huecas o macizas. Hay muchas configuraciones con respecto al relleno, uno de ellos es la densidad que representa la cantidad de material extruido que va a formar el interior de la pieza, la densidad varía entre 0 y 100% como se muestra en la Figura 47; es decir que 100% cuando la pieza es maciza y 0% cuando es hueca [48].

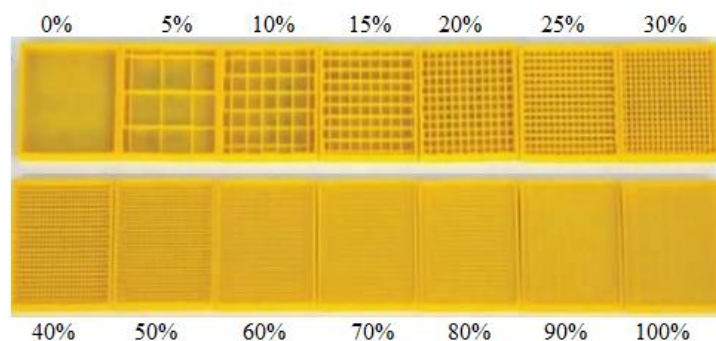


Figura 47. Ejemplos de porcentajes de densidad [16].

1.2.8 Patrón de relleno

El patrón de relleno es otro parámetro que influye en la estructura interna y el diseño de la pieza o prototipo, lo cual, le permite soportar mayores o menores esfuerzos [48].

Este parámetro depende del software a utilizar, el cual, generará estructuras homogéneas en el interior de la pieza hasta completar el porcentaje de densidad seleccionado [42].

En la Figura 48, se muestran diferentes estructuras de relleno, donde las más usadas son: hexagonal o panal de abeja, lineal, concéntrico, y zigzag.

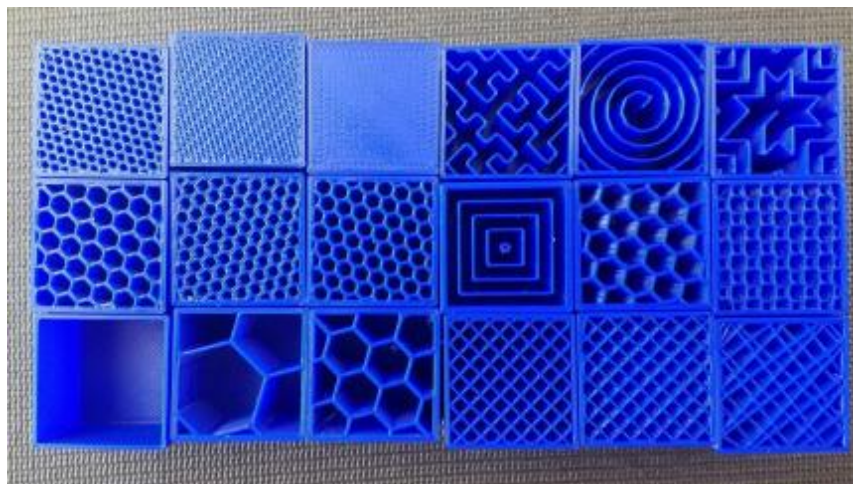


Figura 48. Diferentes configuraciones de patrones de relleno para impresión 3D [48].

1.2.9 Orientación de Impresión

La orientación de la pieza a imprimir se debe seleccionar antes de empezar con el proceso de impresión 3D, porque es un parámetro que afecta al tiempo de impresión, la cantidad de material, y a la resistencia mecánica de la pieza.

En la Figura 49 se muestra la impresión 3D de un elemento en diferentes orientaciones [48]. En el primer caso (izquierda) la pieza no se puede imprimir directamente debido a que es necesario utilizar soportes lo que implica que se utilice más filamento y se emplee más tiempo en la impresión, y en el segundo caso (derecha)

la pieza no necesita soportes en la mayoría de su estructura por lo tanto se optimiza el material y el tiempo de impresión [48].

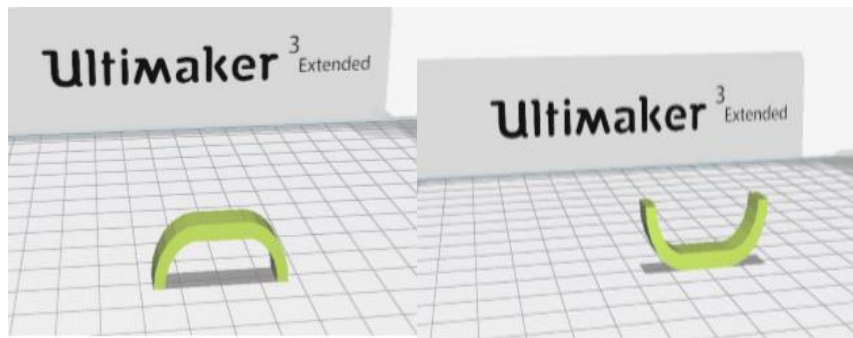


Figura 49. Pieza en forma de “U” con orientación diferente de impresión [48].

Además, el comportamiento anisotrópico de los materiales impresos en 3D, hace que presenten un rendimiento estructural que depende de la orientación de impresión, especialmente cuando se desea conseguir el máximo esfuerzo a la tracción, esto influye mucho si coincide el filamento fundido con la dirección de extracción como se muestra en la Figura 50 [15].

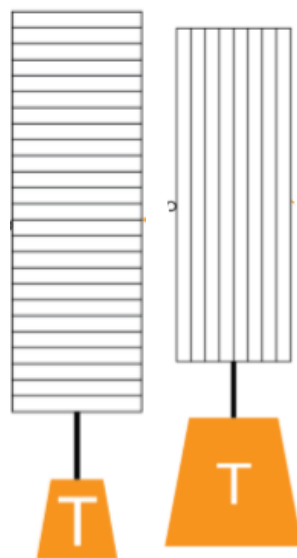


Figura 50. Representación de la Carga máxima dependiendo de la orientación [48].

1.2.10 Temperatura de Extrusión y Plataforma o Cama

La temperatura de extrusión se refiere al momento de salida del material lo que es de gran importancia porque depende del tipo de material utilizado, ya que cada material tiene su propia temperatura de fusión y de cristalización. Por lo tanto, antes de iniciar

con la impresión 3D se debe conocer estos rangos de temperatura de impresión, la cual depende del material, y de su origen de fabricación. Esta temperatura suele ser recomendada entre 10-15°C. Debido a este rango de temperatura se debe realizar pruebas de ensayo para elegir con qué valor se obtienen mejores resultados. Un mal uso de la temperatura afecta a la precisión dimensional, calidad y en su dureza [48]. El color del material también influye en la temperatura, debido a que algunos filamentos utilizan colorantes que hacen que varíen con la temperatura de fusión hasta en 5°C [13].

La temperatura de la cama de impresión también es un parámetro influyente que depende del material, sobre todo en materiales que tienen temperaturas de fusión altas como el ABS o el PET, esto se debe a que el material al salir del extrusor tiene una temperatura elevada y si se deposita en una cama a baja temperatura, el material se enfría tan rápido que hace que no se adhiera a la cama de impresión, este parámetro es muy crítico a la hora de extruir la primera capa que será la base para el resto de la pieza. Este valor de temperatura también es detallado según el fabricante del filamento [13], [33].

1.2.11 Velocidad de impresión

Este parámetro controla la velocidad con la que el extrusor se desplaza mientras se funde el material y se deposita en la cama de impresión [48]. La velocidad es un determinante en el tiempo de impresión de manera que, cuando la velocidad de impresión es más alta, el tiempo se reduce; que a su vez influye en la calidad de la pieza final, por lo tanto, el costo de la pieza puede ser mayor o menor dependiendo de su calidad final [13], [11]. Cuando se utiliza velocidades muy altas de impresión, se puede tener problemas en la calidad de la pieza, porque no se logra que las capas se adhieran de manera correcta, especialmente cuando existen partes pequeñas, o con muchos detalles como se muestra en la Figura 51 [13].



Figura 51. Error en la adherencia de las capas debido a una velocidad de impresión muy elevada [13].

La velocidad es un parámetro que depende también de ciertas variantes, porque existen varias velocidades dependiendo de la impresora que se use, ya sea para primeras capas, capas externas, extrusión de material de soporte y otros más. En la Tabla 11 se indican ciertos rangos que se pueden utilizar dependiendo de la zona de impresión.

Tabla 11. Rangos de velocidad dependiendo de la zona de impresión [48].

Zonas de impresión	Rango de Velocidad
Perímetros externos	15 – 20 mm/s
Perímetros pequeños (agujeros)	15 – 20 mm/s
Perímetros internos	< 60 mm/s
Relleno interno	Se puede usar velocidades altas dependiendo de la impresora y el material 60 – 120 mm/s
Capas externas	20 – 25 mm/s
Capas sólidas no externas	50- 60 mm/s

La mayoría de los parámetros influyen considerablemente en las características mecánicas del objeto impreso, por lo tanto, conocer los principales parámetros de impresión es de mucha importancia a la hora de realizar el diseño y continuar con la fabricación.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Diseño de las probetas

2.1.1 Ensayo de tracción

Para la caracterización de los materiales se realizó ensayos de tracción basados en la norma ASTM D638-14, como se muestra en la Figura 52.

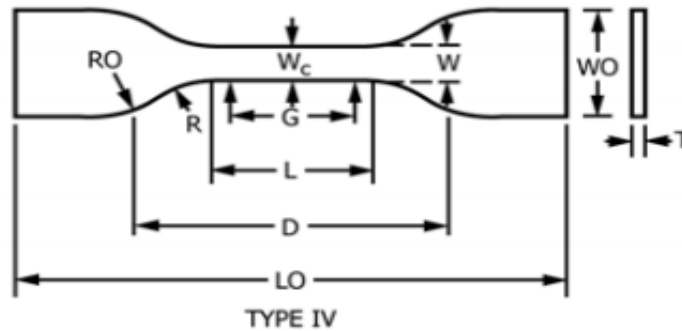


Figura 52. Diseño de probeta según norma ASTM D638-14

Las medidas correspondientes a la Norma ASTM D638 se encuentran en la Tabla 12.

Tabla 12. Medidas de Probetas para ensayo de Tracción [51].

Dimensions(see drawins)	Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.)					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), inc	4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type II	Type IV	Type V	
W -Width of narrow section	13(0.50)	6 (0.25)	19(0.75)	6(0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02)
L -Length of narrow section	57(2.25)	57(2.25)	57(2.25)	33(1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02)
WO-Width overall, min	19(0.75)	19(0.75)	29(1.13)	19(0.75)	-----	+ 6.4(+0.25)
WO-Width overall, min	-----	-----	-----	-----	9.53 (0.375)	+3.18(+0.125)
LO-Length overall, min	165(6.5)	183(7.2)	246(9.7)	115(4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G-Gage length	50(2.00)	50(2.00)	50(2.00)	-----	7.62 (0.300)	±0.25(±0.010)
G-Gage length	-----	-----	-----	25 (1.00)	-----	±0.13(±0.005)
D-Distance between grips	115(4.5)	135(5.3)	115(4.5)	65 (2.5)	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R-Radius of fillet	76(3.00)	76(3.00)	76(3.00)	14(0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04)
RO-Outer radius (Type IV)	-----	-----	-----	25(1.00)	-----	±1 (±0.04)

Teniendo en cuenta todas las medidas y los tipos de probetas se seleccionó el Tipo IV para la fabricación y aplicación de los ensayos. Las probetas Tipo IV se utilizan especialmente con probetas que pueden ser semirrígidas o no rígidas, la geometría seleccionada se puede observar en la Figura 53.

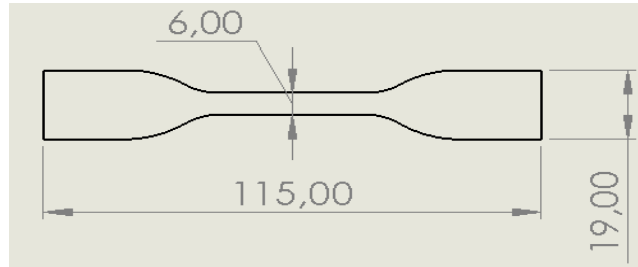


Figura 53. Dimensiones de la probeta para los ensayos a tracción según norma ASTM D638-14.

2.1.2 Ensayo de flexión

Para los ensayos de flexión se utilizó la norma ASTM D679 con las medidas que se muestran en la Figura 54:

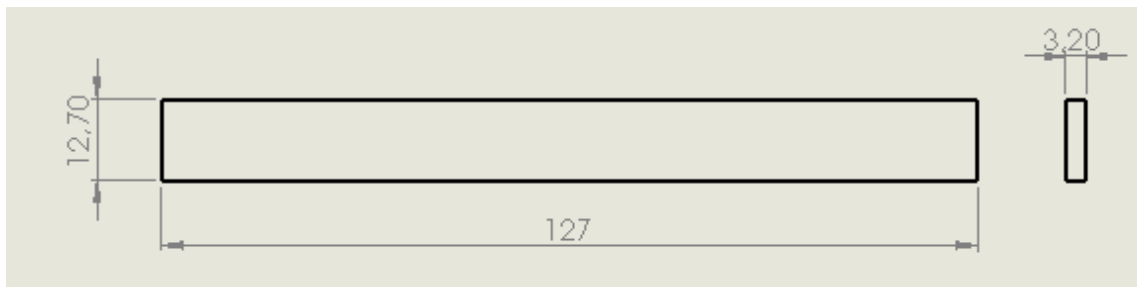


Figura 54. Dimensiones de la probeta para ensayos de flexión según Norma ASTM D679-10.

2.2 Diseño CAD y conversión a G-code

Esta parte de la investigación consistió principalmente en utilizar dos software, el uno que ayude a realizar el diseño en 3D con las medidas de probetas ya mencionadas anteriormente y que proporcione un archivo compatible con el software encargado en realizar el G-code, y que además sea compatible con la impresora utilizada.

2.2.1 SolidWorks

El software CAD permite realizar el diseño 3D de las probetas con medidas ya antes mencionadas. Existen varios software CAD como SolidWorks, Autodesk, Inventor, Siemens NX, entre otros más.

Para el diseño en este caso se utilizó SolidWorks debido a su facilidad de realizar piezas en 3D, y además el software proporciona el archivo en formato STL, que es indispensable para realizar la transformación a G-code de una manera más fácil y directa. La Figura 55 y Figura 56 muestra el diseño CAD de las probetas realizadas en el software, los planos de las probetas se presentan en el Anexo 3 y Anexo 4.

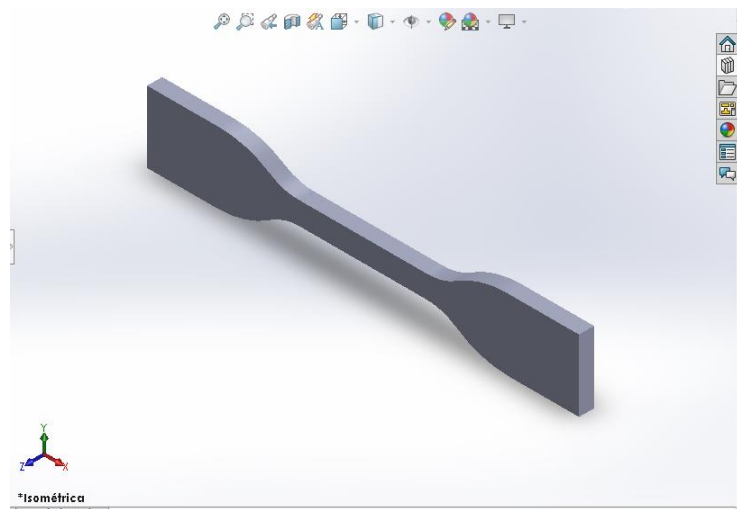


Figura 55. Diseño CAD de probeta para ensayo de tracción.

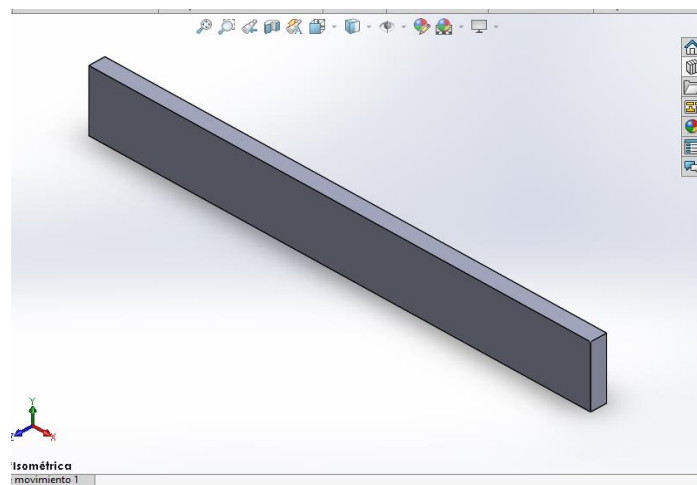


Figura 56. Diseño CAD de probeta para ensayo de flexión.

2.2.2 Ultimate Cura

Para la transformación del archivo se utiliza el software libre (Ultimate Cura) conocido como un software de corte; donde el corte empieza al tener el archivo del modelo 3D en formatos como: STL, ONJ, X3D o 3MF, estos formatos pueden ser obtenidos desde diversos softwares CAD que en nuestro caso es SolidWorks con el

formato STL [52]. Una característica especial del software Cura, es que tiene una interfaz visual interactiva con opciones de rotación y escalado, y además es muy rápido cuando se carga o se guarda los archivos. Este software tiene una debilidad con respecto a la generación de soportes, ya que no son tan complejos ni avanzados como lo son en el software Kisslicer, como se muestra en la Figura 57, el cual, no utiliza soportes en la fabricación de las probetas [50].

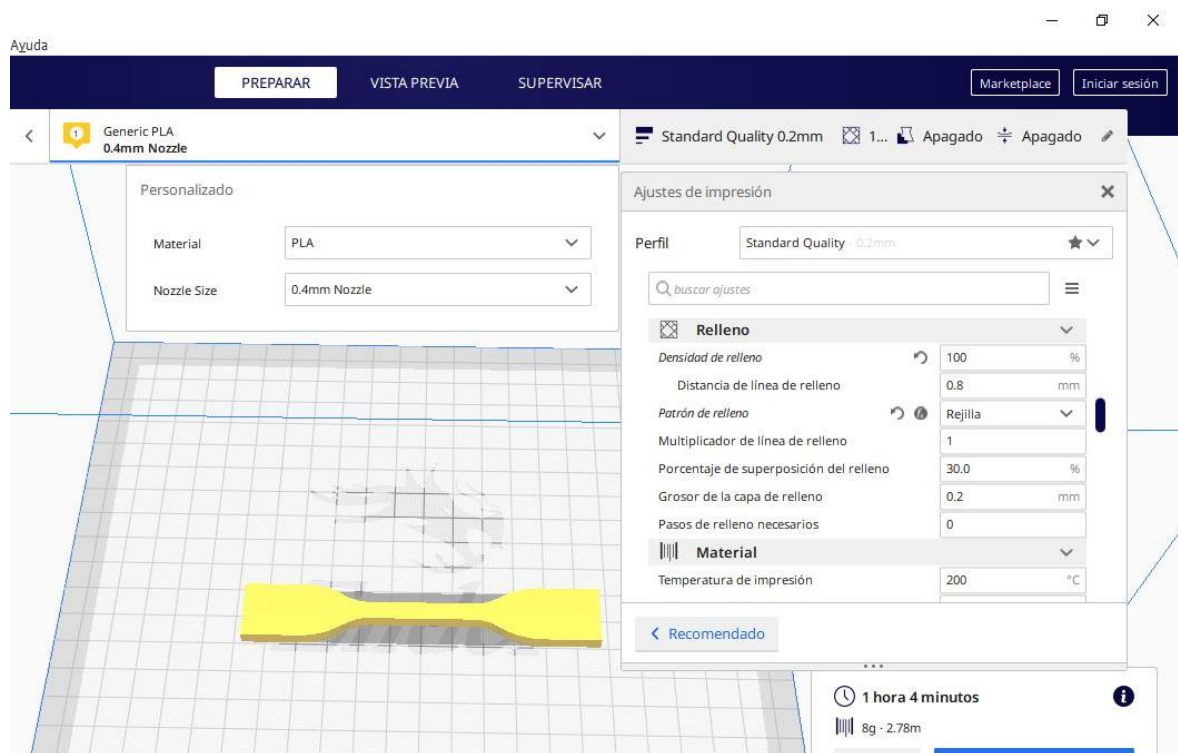


Figura 57. Ventana del software cura.




El formato STL es el más utilizado por la impresión 3D, STL es la abreviatura de estereolitografía (Stereolithography), pero también es conocido como “Lenguaje de triángulo estándar” o “Lenguaje de teselación estándar” [53].

Luego de tener el archivo STL se debe realizar la conversión a un código que pueda ser interpretado por la impresora 3D. El software CURA es un programa *open source* que hace el trabajo de obtener el G-code para que sea interpretado por la impresora.

2.3 Parámetros de estudio

En la Tabla 13 se detalla todos los parámetros que influyen en la impresión de las probetas y su intervención con respecto al tipo de parámetro, es decir, si es un valor constante o variable.

Tabla 13. Parámetros de estudio

Parámetro	Característica	Justificación	Tipo
Material	PLA y ABS	Materiales más utilizados en la impresión 3D	Constante
Densidad	100 %	La densidad del relleno influye principalmente en si la pieza fabricada es maciza o rígida, y se evalúa con la densidad máxima para encontrar los mejores resultados posibles	Constante
Patrón de relleno	Rejilla		Variable
	Triángulos		
	Octeto		
Velocidad	50 mm/s PLA 45 mm/s ABS	La velocidad depende del material y del fabricante	Constante
Temperatura de extrusor	200°C PLA 240°C ABS	Al igual que la velocidad este parámetro depende del material y del fabricante	Constante
Temperatura de cama	50°C PLA 90°C ABS	El parámetro de temperatura de la cama no es necesario en el caso del PLA, pero si influye de manera directa en la calidad de impresión del ABS.	Constante
Espesor de capa	0.2	Espesor de capa recomendado para el uso de la impresora en el cual se obtienen un buen acabado superficial.	Constante

2.4 Características de los materiales utilizados

Tabla 14. Propiedades del material PLA usado en la impresión de probetas

Propiedad	Norma	Típico valor
Densidad (g/cm^3)	ASTM D792	1,24
Temperatura de impresión (°C)	----	190-230
Esfuerzo de Tensión (MPa)	ASTM D638	44,2±1,3
Elongación a la rotura (%)	ASTM D638	2,0±0,4
Módulo de flexión (MPa)	ASTM D790	3100±220
Esfuerzo de flexión (MPa)	ASTM D790	84,1±2,2

Para más información sobre el filamento utilizado, revisar el Anexo 1.

Tabla 15. Propiedades del material ABS usado en la impresión de probetas

Propiedad	Norma	Típico valor
Peso del filamento (g)	-----	750
Longitud del filamento (m)	-----	Aprox. 107
Módulo de tensión (MPa)	ISO 527	1618,5
Esfuerzo de Tensión a la rotura (MPa)	ISO 527	33,9
Elongación a la rotura (%)	ISO 527	4,8
Módulo de flexión (MPa)	ISO 178	2070
Resistencia a la flexión (MPa)	ISO 178	70,5
Resistencia al impacto Izod a 23°C (KJ/m ²)	ISO 180	10,5

Para más información sobre el filamento utilizado, revisar el Anexo 2.

2.5 Características de la impresora

En la Figura 58, se muestra la impresora utilizada para la manufactura de las probetas, y en la Tabla 16 , se indica sus características técnicas.



Figura 58. Impresora 3D Ender 3 Pro.

Tabla 16. Características de la impresora 3D Ender 3 pro.

Descripción	Valor
Peso neto	8,9 kg
Material de estructura	Aluminio
Dimensiones	440x420x465 mm
Tecnología de impresión	FDM (Fused Deposition Modeling)
Cabezal de impresión	Boquilla intercambiable
Volumen de impresión	220x220x250 mm
Diámetro de filamento	1,75 ABS/PLA, madera, flexible, fibra de carbono,
Precisión	±0,1mm
Velocidad de impresión	≤ 180 mm/s, normal 60 mm/s
Temperatura de la boquilla	Máximo 255 °C
Temperatura de la cama	≤ 100 °C
Software de corte	Cura/Reptier/-Host/Simplify3D

CAPÍTULO III

3. ENSAYOS Y RESULTADOS

3.1 Impresión de probetas

En la Figura 59 y en la Figura 60 se muestra las probetas impresas en PLA-Blanco y ABS-Rojo para hacer los ensayos de tracción y flexión respectivamente.

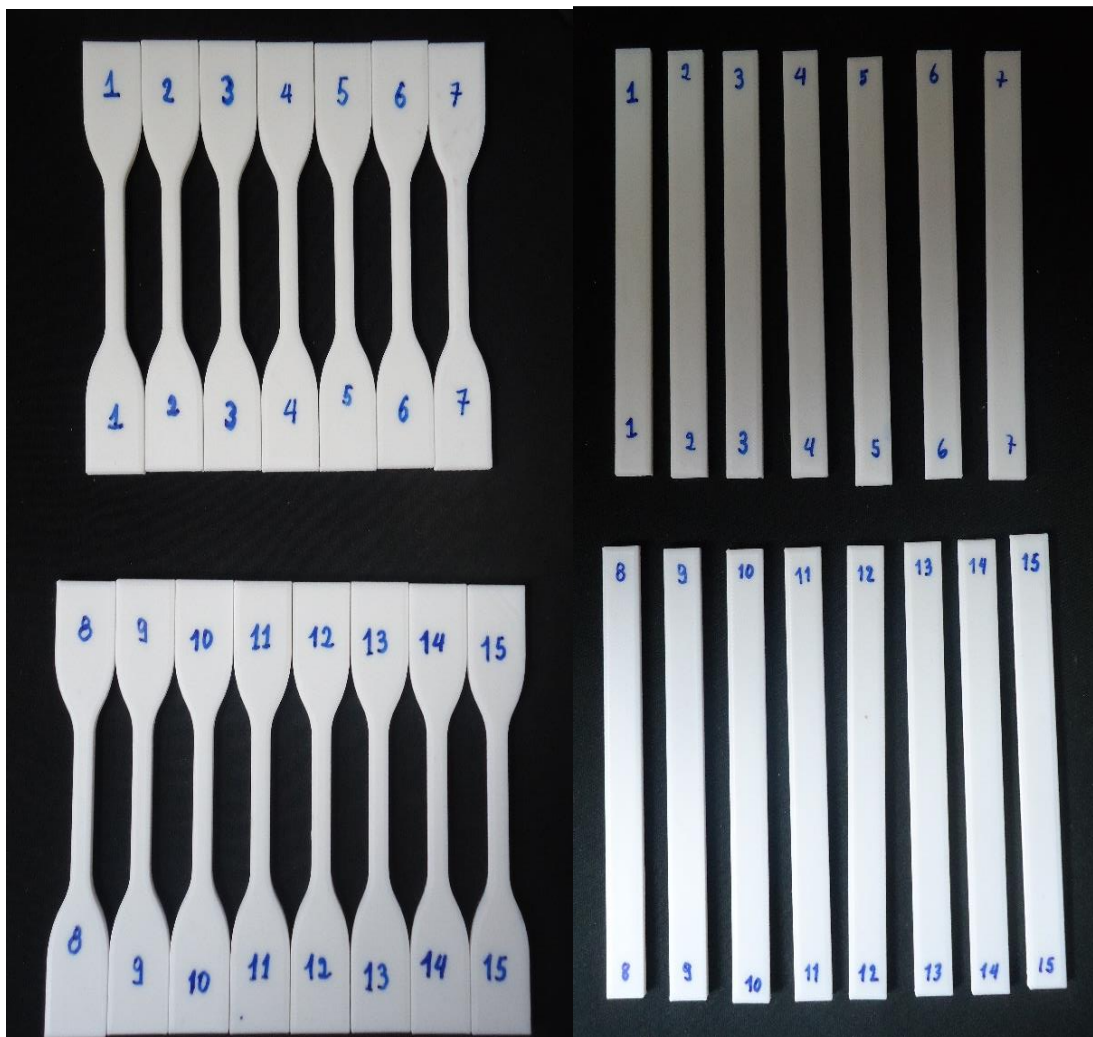


Figura 59. Probetas de tracción y flexión impresas en PLA.

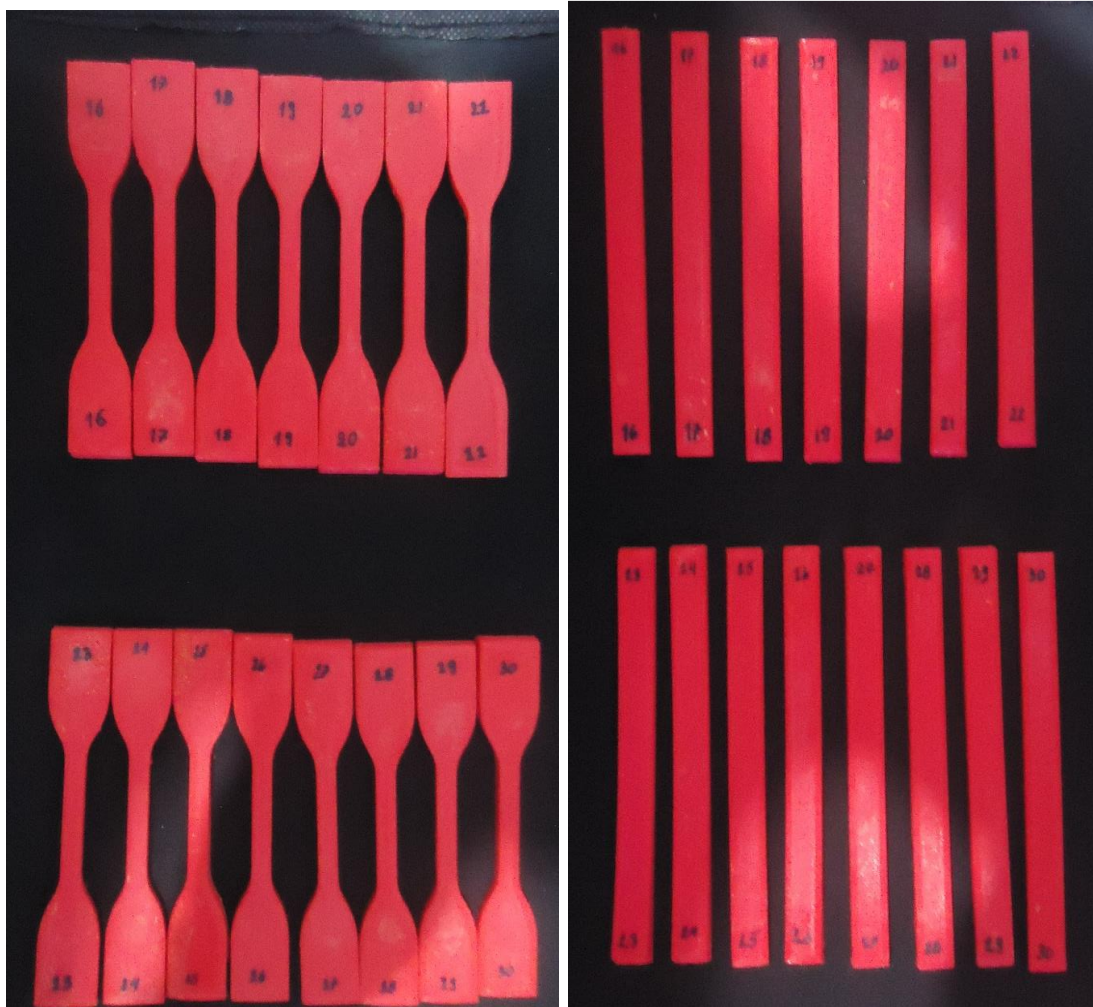


Figura 60. Probetas de tracción y flexión impresas en ABS.

En la Tabla 17 y en la Tabla 18 se muestra las características físicas de las diferentes probetas listas para ser ensayadas. Para lo cual, se las enumera, y se establecen grupos de 5 especímenes de acuerdo con el patrón de relleno para cada ensayo de tracción y flexión como lo recomienda la norma ASTM D638 y ASTM D790 respectivamente.

Tabla 17. Resultados de la impresión de probetas a tracción

N° de probeta	Patrón de relleno	Tiempo de impresión (minutos)	Dimensiones reales (Lx A x E)	Masa de la probeta (gramos)	Material
1	Rejilla	1h 4min	114x6x3,2	6,38	PLA
2	Rejilla	1h 4min	114,6x6,1x3,5	6,42	PLA
3	Rejilla	1h 4min	114,8x6,2x3,8	6,38	PLA
4	Rejilla	1h 4min	114,8x6,2x3,8	6,46	PLA
5	Rejilla	1h 4min	115x6x3,2	6,40	PLA
6	Triángulos	1h 4min	114,7x6x3,3	6,42	PLA
7	Triángulos	1h 4min	114,3x6x3,4	6,56	PLA
8	Triángulos	1h 4min	114,6x6,2x3,2	6,42	PLA
9	Triángulos	1h 4min	114,8x6x3,4	6,44	PLA
10	Triángulos	1h 4min	114,5x6,1x3,5	6,46	PLA
11	Octeto	1h 4min	114,6x6,2x3,6	6,46	PLA
12	Octeto	1h 4min	114,8x6x3,7	6,44	PLA
13	Octeto	1h 4min	114,8x6,2x3,7	6,40	PLA
14	Octeto	1h 4min	114,9x6x3,6	6,42	PLA
15	Octeto	1h 4min	114,9x6x3,7	6,46	PLA
16	Rejilla	1h 17min	114x6,3x4	6,14	ABS
17	Rejilla	1h 17min	114,6x6x4	6,2	ABS
18	Rejilla	1h 17min	114,3x6,1x3,9	6,16	ABS
19	Rejilla	1h 17min	114x6,2x4	6,16	ABS
20	Rejilla	1h 17min	114,4x6x4	6,18	ABS
21	Triángulos	1h 17min	114,4x6,2x4	6,14	ABS
22	Triángulos	1h 17min	114,4x6x4,1	6,18	ABS
23	Triángulos	1h 17min	114,5x6,2x4	6,18	ABS
24	Triángulos	1h 17min	114,4x6,1x4	6,16	ABS
25	Triángulos	1h 17min	114,3x6,3x4	6,16	ABS
26	Octeto	1h 17min	114,4x6x4	6,22	ABS
27	Octeto	1h 17min	114,5x6,1x4,1	6,20	ABS
28	Octeto	1h 17min	114,3x6,2x4	6,18	ABS
29	Octeto	1h 17min	114,4x6,2x4,1	6,20	ABS
30	Octeto	1h 17min	114,3x6x4	6,20	ABS

Para las probetas de tracción las medidas reales que se tomaron son: Longitud total (L), Ancho de sección angosta (A) y Espesor (E)

Tabla 18. Resultados de la impresión de probetas a flexión

Nº de probeta	Patrón de relleno	Tiempo de impresión (minutos)	Dimensiones reales (Lx A x E)	Masa de la probeta (gramos)	Material
1	Rejilla	57min	126,4x12,6x2,7	5,44	PLA
2	Rejilla	57min	127x12,7x2,8	5,42	PLA
3	Rejilla	57min	128x13x3	5,46	PLA
4	Rejilla	57min	127,5x12,8x2,7	5,40	PLA
5	Rejilla	57min	128x13x3	5,46	PLA
6	Triángulos	57min	126,4x12,9x2,8	5,42	PLA
7	Triángulos	57min	128x12,5x2,8	5,72	PLA
8	Triángulos	57min	127,6x12,8x2,8	5,46	PLA
9	Triángulos	57min	126,4x12,8x3	5,72	PLA
10	Triángulos	57min	127,1x12,9x2,8	5,42	PLA
11	Octeto	57min	126,4x12,8x2,8	5,50	PLA
12	Octeto	57min	126,4x12,9x2,9	5,52	PLA
13	Octeto	57min	127,2x12,9x2,8	5,40	PLA
14	Octeto	57min	126,5x12,7x3	5,46	PLA
15	Octeto	57min	127x12,9x2,8	5,40	PLA
16	Rejilla	1h 7min	126,4x12,9x3,3	5,52	ABS
17	Rejilla	1h 7min	126,4x12,8x3,4	5,54	ABS
18	Rejilla	1h 7min	126,4x12,9x3,4	5,56	ABS
19	Rejilla	1h 7min	126,3x12,8x3,3	5,52	ABS
20	Rejilla	1h 7min	126,3x12,7x3,3	5,52	ABS
21	Triángulos	1h 7min	126,4x12,8x3,3	5,50	ABS
22	Triángulos	1h 7min	126,4x12,7x3,5	5,54	ABS
23	Triángulos	1h 7min	126,4x12,8x3,3	5,56	ABS
24	Triángulos	1h 7min	126,4x12,7x3,5	5,54	ABS
25	Triángulos	1h 7min	126,3x12,9x3,31	5,48	ABS
26	Octeto	1h 7min	126,4x12,8x3,2	5,48	ABS
27	Octeto	1h 7min	126,4x13x3,3	5,48	ABS
28	Octeto	1h 7min	126,5x13x3,3	5,48	ABS
29	Octeto	1h 7min	126,3x12,8x3,3	5,48	ABS
30	Octeto	1h 7min	126,3x12,9x3,4	5,48	ABS

Para las probetas de flexión las medidas reales que se tomaron son: Longitud total (L), Ancho de sección transversal (A) y Espesor (E)

3.2 Ensayo de Tracción

Los ensayos se realizaron en la máquina Tinius Olsen H25KS, máquina donde se puede hacer diferentes tipos de ensayos, debido a que las sujeciones son intercambiables dependiendo del ensayo a realizar. La Figura 61 muestra la máquina de ensayos con una probeta de PLA lista para ser sometida al ensayo.



Figura 61. Máquina de ensayos a tracción y flexión.

Además, contiene un extensómetro para medir las elongaciones durante la aplicación de la carga ya sea de tracción u otro tipo de ensayo (Figura 62).



Figura 62. Extensómetro de la máquina de ensayos.

Los ensayos se llevaron a cabo bajo la norma ASTM D638-14 en el laboratorio de nuevos materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), luego de tomar a consideración todos los factores que influyen en los ensayos, y los parámetros que recomienda la norma para la ejecución, los resultados fueron los siguientes.

Tabla 19. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Rejilla en PLA

Material	N°	Resistencia última a tracción (MPa)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Deformación a la rotura (%)
PLA	1	38,23	0,28	9.250,56	32,65	-
PLA	2	38,81	0,21	9.339,86	36,71	0,28
PLA	3	37,42	0,33	11.134,36	35,22	-
PLA	4	35,20	0,19	9.740,44	32,12	0,30
PLA	5	35,91	0,26	10.108,92	32,22	0,39
Promedio \bar{X}		37,11	0,25	9.914,83	33,78	0,32
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		1,53	0,06	762,76	2,07	0,06
Coefficiente de variación CV		4,11	22,03	7,69	6,12	18,12

En la Tabla 19 las probetas 1 y 2 no se rompieron en la región calibrada de la probeta y por lo tanto no se registra el valor de la deformación a la rotura. En la Figura 63 se puede apreciar las fracturas en las probetas y la región calibrada.

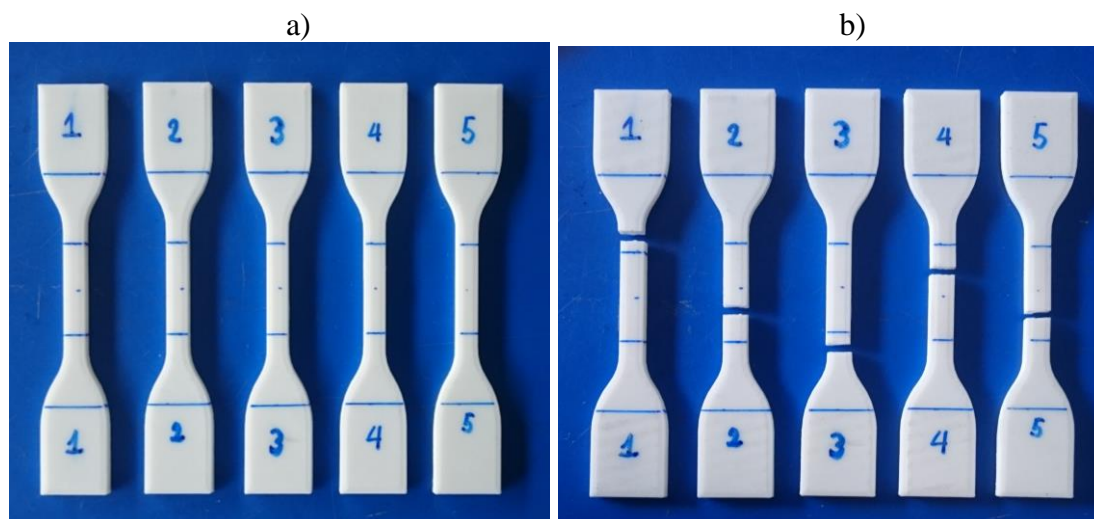


Figura 63. Probetas impresas en “PLA” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas.

Tabla 20. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Triángulos en PLA

Material	N°	Resistencia última a tracción (MPa)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Deformación a la rotura (%)
PLA	6	32,32	0,28	11.482,98	31,55	0,31
PLA	7	33,57	0,41	8.645,74	32,23	0,71
PLA	8	34,41	0,28	10.494,96	31,95	0,37
PLA	9	35,73	0,25	10.598,50	31,32	-
PLA	10	35,40	0,30	10.854,61	31,12	0,49
Promedio \bar{X}		34,29	0,30	10.415,36	31,63	0,47
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		1,39	0,06	1061,15	0,45	0,18
Coficiente de variación CV		4,05	20,36	10,19	1,44	37,58

En la Tabla 20 la probeta 9 no se rompió dentro de la región calibrada, por lo tanto, no contiene un valor de deformación a la rotura. En la Figura 64 se observan las fracturas en cada una de las probetas configuradas con el patrón de relleno en configuración de triángulos.

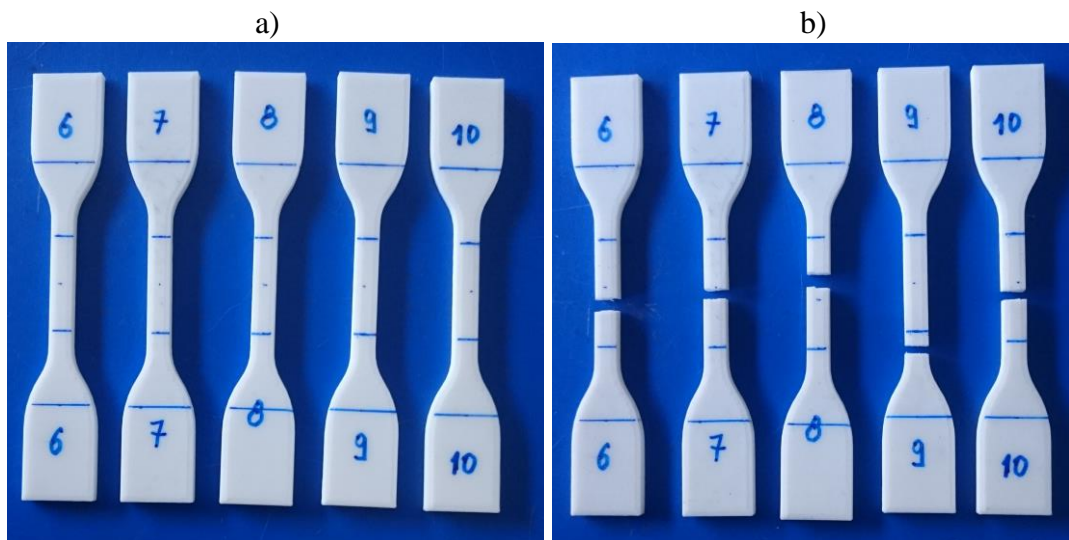


Figura 64. Probetas impresas en “PLA” con patrón de triángulo, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas

Tabla 21. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Octeto en PLA

Material	N°	Resistencia última a tracción (MPa)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Deformación a la rotura (%)
PLA	11	34,86	0,34	11.551,59	30,93	-
PLA	12	36,09	0,21	9.854,05	29,20	-
PLA	13	35,16	0,33	12.315,05	27,83	1,06
PLA	14	35,71	0,31	11.098,08	28,55	-
PLA	15	36,48	0,31	12.678,55	28,59	-
Promedio \bar{X}		35,66	0,30	11.499,46	29,02	-
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		0,66	0,05	1109,80	1,17	-
Coefficiente de variación CV		1,85	17,32	9,65	4,04	-

La Tabla 21, muestra la configuración de patrón octeto en la cual, solo la probeta 13 se fracturó dentro de la zona calibrada, por lo tanto, muestra un valor de deformación a la rotura, en la Figura 65 se expresan las fracturas de las probetas configuradas con éste patrón.

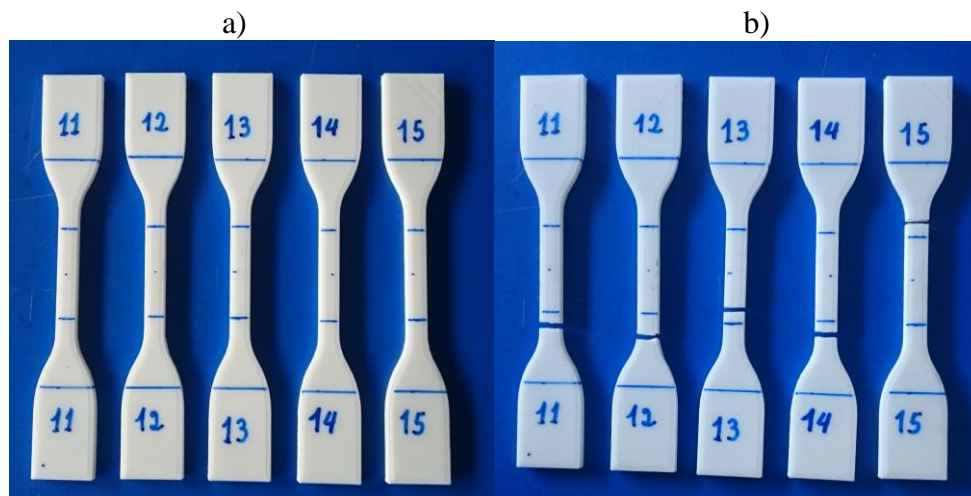


Figura 65. Probetas impresas en “PLA” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas

Tabla 22. Resultado de ensayo de tracción de probetas con patrón Rejilla en ABS

Material	N°	Resistencia última a tracción (MPa)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Deformación a la rotura (%)
ABS	16	22,60	0,36	7.746,89	18,35	-
ABS	17	24,47	0,33	6.857,01	20,61	-
ABS	18	22,62	0,27	6.257,52	18,09	-
ABS	19	22,58	0,24	6.649,43	18,36	-
ABS	20	21,47	0,30	6.780,3	17,29	2,61
Promedio \bar{X}		22,75	0,30	6.858,23	18,54	-
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		1,08	0,05	547,78	1,24	-
Coficiente de variación CV		4,75	15,81	7,99	6,67	-

La Tabla 22 se observa, que solo la probeta 20 tuvo una fractura dentro de la región calibrada y por eso adquiere un valor de deformación a la rotura. En la Figura 66 se representa las zonas de fracturas de cada probeta.

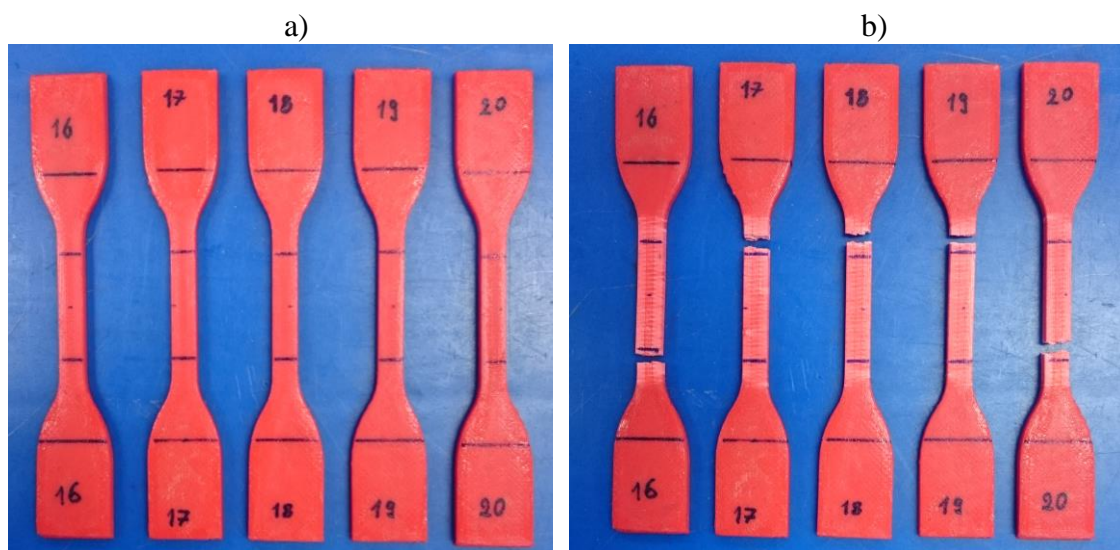


Figura 66. Probetas impresas en “ABS” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y, b) luego de ser ensayadas.

Tabla 23. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Triángulos en ABS

Material	Nº	Resistencia última a tracción (MPa)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Deformación a la rotura (%)
ABS	21	23,13	0,33	10.260,47	18,93	-
ABS	22	23,16	0,38	7.620,24	19,03	1,46
ABS	23	22,75	0,18	5.838,71	17,84	-
ABS	24	23,55	0,11	4.678,04	19,42	2,53
ABS	25	22,36	0,21	6.432,73	17,82	-
Promedio \bar{X}		22,99	0,24	6.966,04	18,61	2,00
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		0,45	0,11	2.125,53	0,73	0,76
Coefficiente de variación CV		1,97	45,77	30,51	3,94	37,93

En la Tabla 23 se muestra como las probetas 21, 23 y 25 no se fracturaron dentro de la zona calibrada, y no tienen un valor de deformación a la rotura. En la Figura 67 se muestra las zonas de fractura de las probetas con patrón triángulos en ABS.

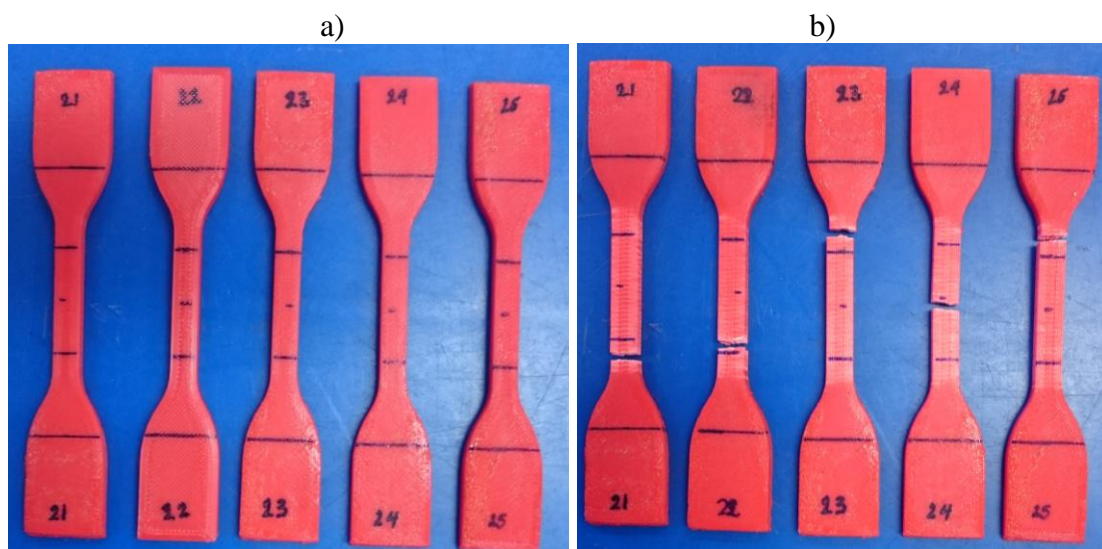


Figura 67. Probetas impresas en “ABS” con patrón de triángulos, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y b) luego de ser ensayadas.

Tabla 24. Resultados de ensayo de tracción de probetas con patrón Octeto en ABS

Material	N°	Resistencia última a tracción (MPa)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Deformación a la rotura (%)
ABS	26	24,03	0,31	7.953,07	19,70	-
ABS	27	22,91	0,39	7.206,37	16,76	1,86
ABS	28	22,97	0,32	8.469,36	18,95	2,60
ABS	29	23,25	0,08	4.886,29	18,97	1,54
ABS	30	23,89	0,38	8.787,99	20,01	-
Promedio \bar{X}		23,41	0,30	7.460,62	18,88	2,00
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		0,52	0,13	1.558,35	1,27	0,54
Coefficiente de variación CV		2,22	42,51	20,89	6,73	27,18

En la Tabla 24, se muestra los resultados obtenidos para la configuración de patrón Octeto , en donde para las probetas 26 y 30 no se pudo obtener el valor de deformación a la rotura, debido a que su fractura no se encuentra dentro de la región calibrada, así, en la Figura 68, se observa las zonas de fractura de estas probetas.

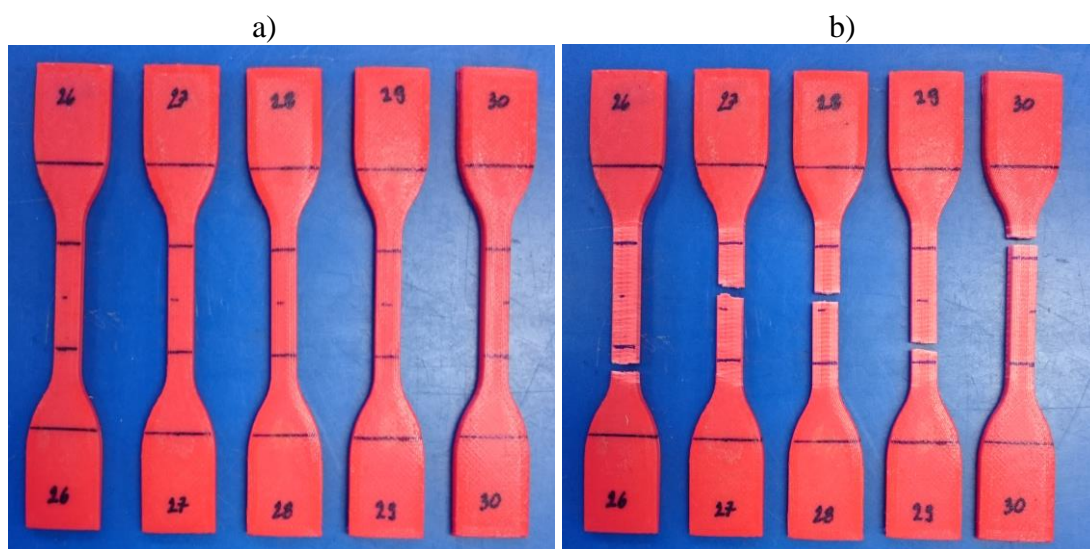


Figura 68. Probetas impresas en “ABS” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de tracción y, b) luego de ser ensayadas.

Para el análisis de resultados se realizó los diagramas de esfuerzo deformación de cada probeta para comprar entre cada patrón de relleno y observar con cual se obtuvo las mejores propiedades mecánicas. Para lo cual, se toma en consideración dos factores; primero que la fractura sea dentro de la zona calibrada, y segundo que se obtengan características lo más cercanas al promedio ya sea con valores superiores o menores, condiciones que son propias de la norma utilizada.

3.2.1 Diagramas esfuerzo deformación obtenidos en los diferentes ensayos de tracción.

3.2.1.1 Diagramas esfuerzo deformación para PLA impreso.

En la Figura 69 se muestra los diagramas esfuerzo deformación para las probetas con mallado tipo rejilla, que son las que presentaron mejor resistencia a la tracción.

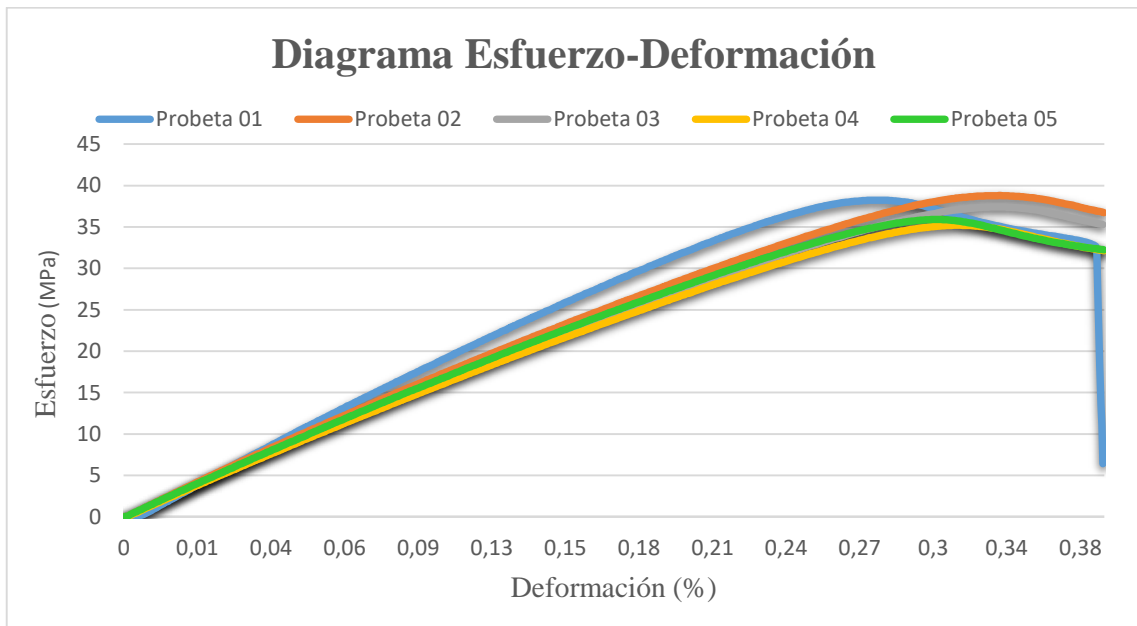


Figura 69. Diagrama esfuerzo – deformación para “PLA” impreso al 100% “mallado en rejilla”.

De acuerdo con la Tabla 19, y sus respectivos diagramas de esfuerzo deformación se toma como probeta representativa la probeta 05.

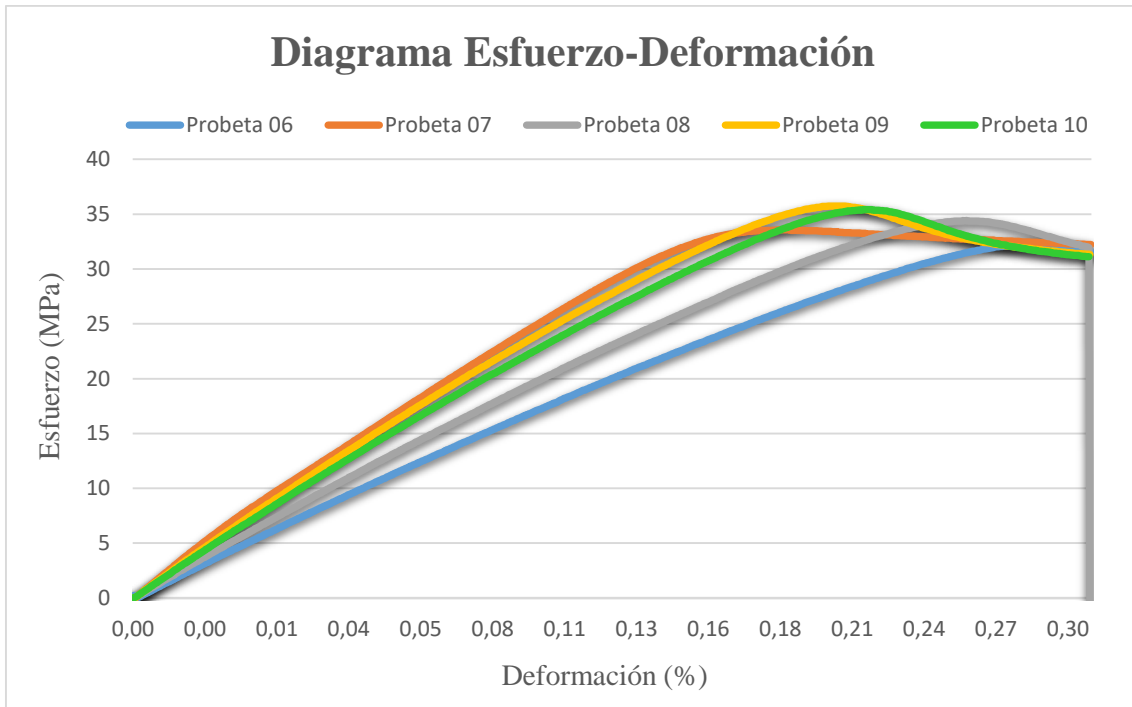


Figura 70. Diagrama esfuerzo – deformación para “PLA” impreso al 100% “mallado en triángulos”.

En la Figura 70, se muestra el diagrama de esfuerzo deformación de las probetas con mallado en triángulos, obteniéndose la probeta 08 es la representativa. La resistencia a la tracción para esta configuración fue menor con respecto a los otros mallados.

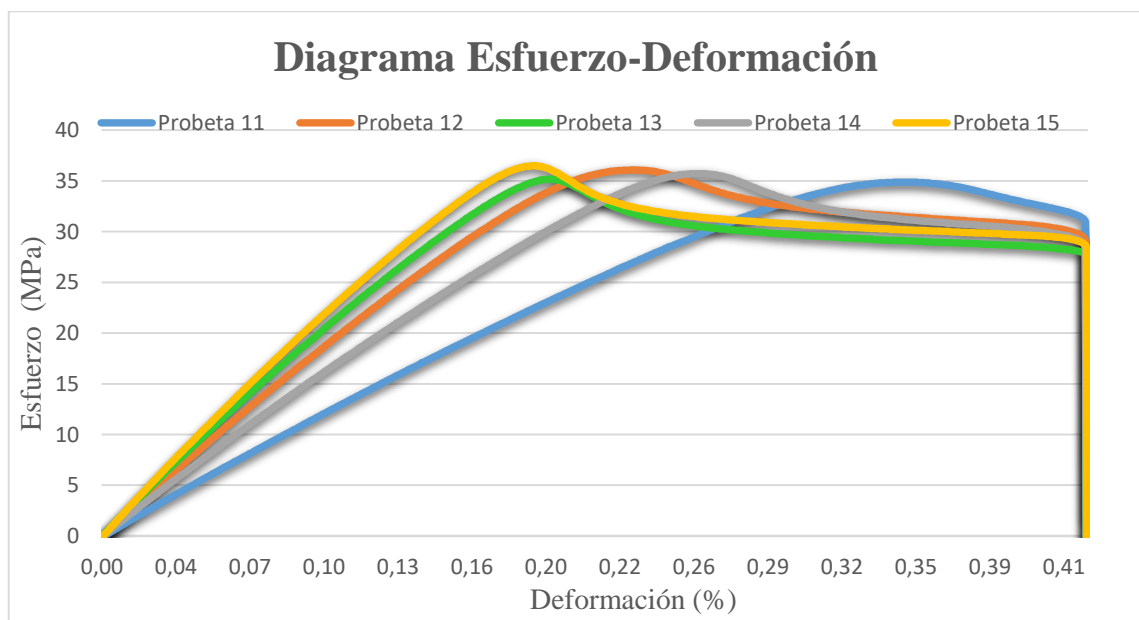


Figura 71. Diagrama esfuerzo – deformación para “PLA” impreso al 100% “mallado en octeto”.

En el diagrama esfuerzo deformación de las probetas con mallado octeto que se muestra en la Figura 71 la probeta más representativa es la probeta 13 debido a que fue

la probeta que se rompió dentro de la zona calibrada, y se acerca más a su valor promedio.

Después observar los diagramas esfuerzo deformación para cada grupo de configuración de impresión de las probetas en PLA, se puede observar la diferencia que existe en sus propiedades mecánicas y cómo influye la configuración de estos patrones de relleno.

Con el patrón en rejilla se consigue mejores resultados con una resistencia a la tracción es de 35,91 MPa, y con el patrón de triángulos que consiguió la menor resistencia con un valor de 34,41 MPa, las probetas con patrón octeto obtuvieron un valor de resistencia a la tracción de 35,15 MPa que, a pesar de no conseguir una gran diferencia con el patrón de triángulos, demuestra ser una configuración con la cual se puede conseguir características mecánicas importantes. A su vez, estos valores no siguen la misma tendencia cuando se analiza el módulo de elasticidad, donde se obtuvo lo siguiente: 10.108,92 MPa; 12.315,05 MPa y 10.494,96 MPa, obteniéndose mejores resultados con la configuración del patrón de relleno en octeto, seguido por la configuración en triángulos y el menor valor se obtuvo para la configuración del patrón de relleno en rejilla.

3.2.1.1 *Diagramas esfuerzo deformación para ABS impreso.*

A continuación, se realiza el análisis del material ABS mostrando los respectivos diagramas de esfuerzo deformación.

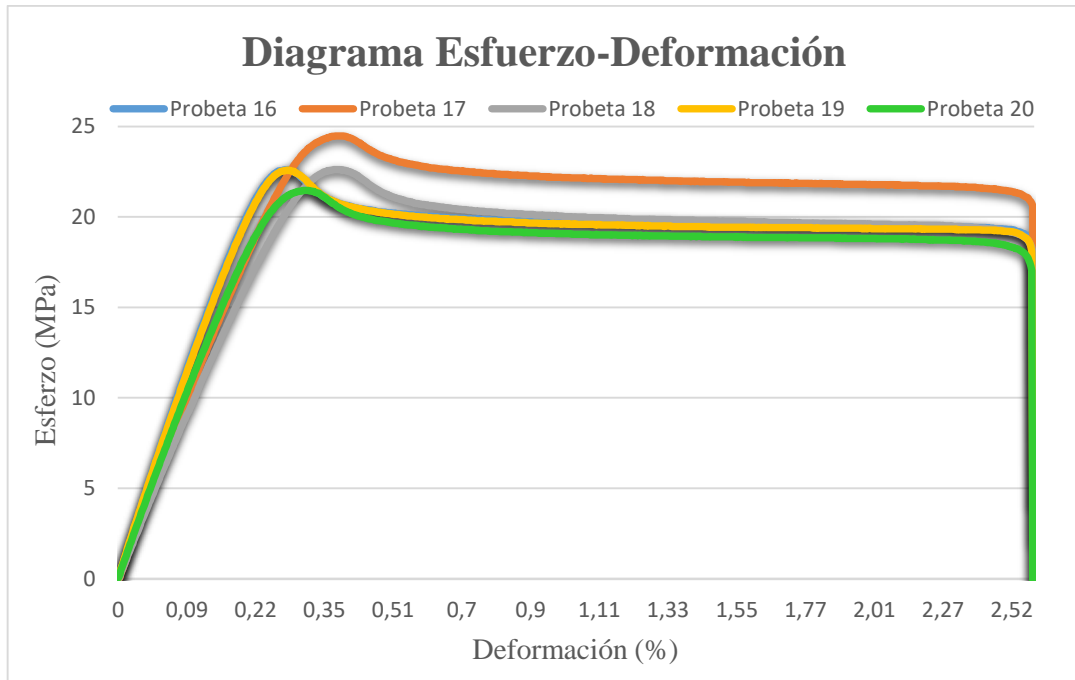


Figura 72. Diagrama esfuerzo – deformación para “ABS” impreso al 100% “mallado en rejilla”.

La Figura 72 muestra los diagramas de esfuerzo deformación de las probetas de ABS con mallado en rejilla y de manera similar al PLA se debe elegir la probeta representativa.

Al analizar las condiciones se concluye que la probeta representativa para el ABS impreso con mallado en rejilla es la probeta 20, que en el diagrama se encuentra en color verde.

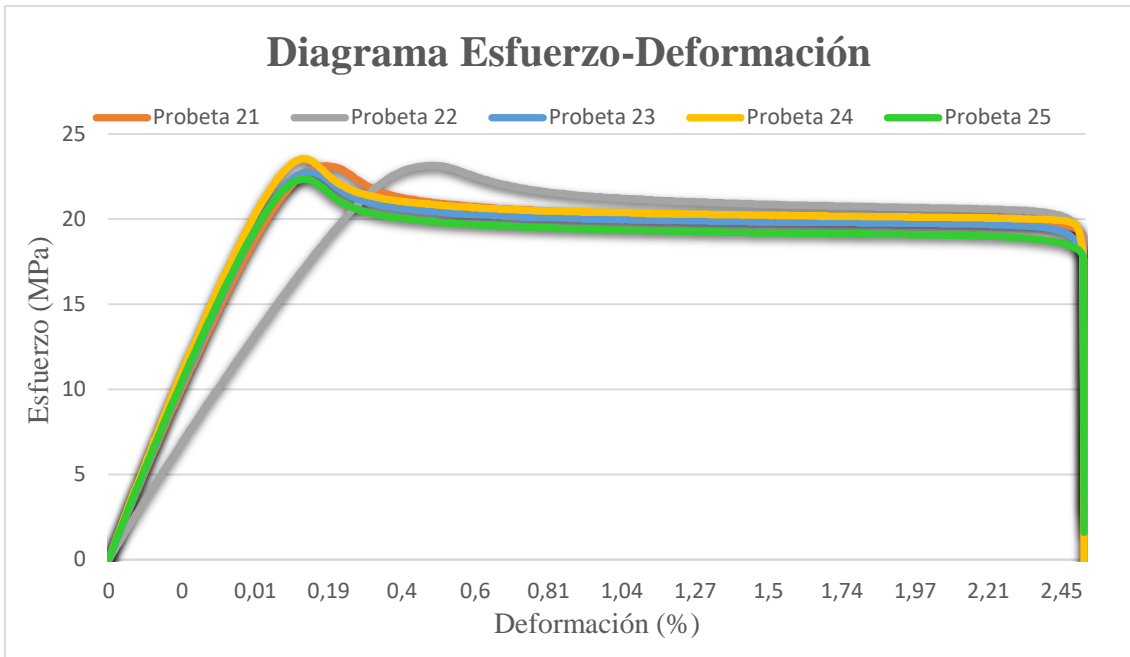


Figura 73. Diagrama esfuerzo – deformación para “ABS” impreso al 100% “mallado en triángulos”.

La Figura 73 muestra los diagramas esfuerzo deformación de las probetas en ABS con mallado en triángulos, para elegir la probeta más representativa se revisó las condiciones, y como se muestra en la Tabla 23 la probeta que cumple con esto es la probeta 22 que en este caso se muestra en el diagrama en color gris.

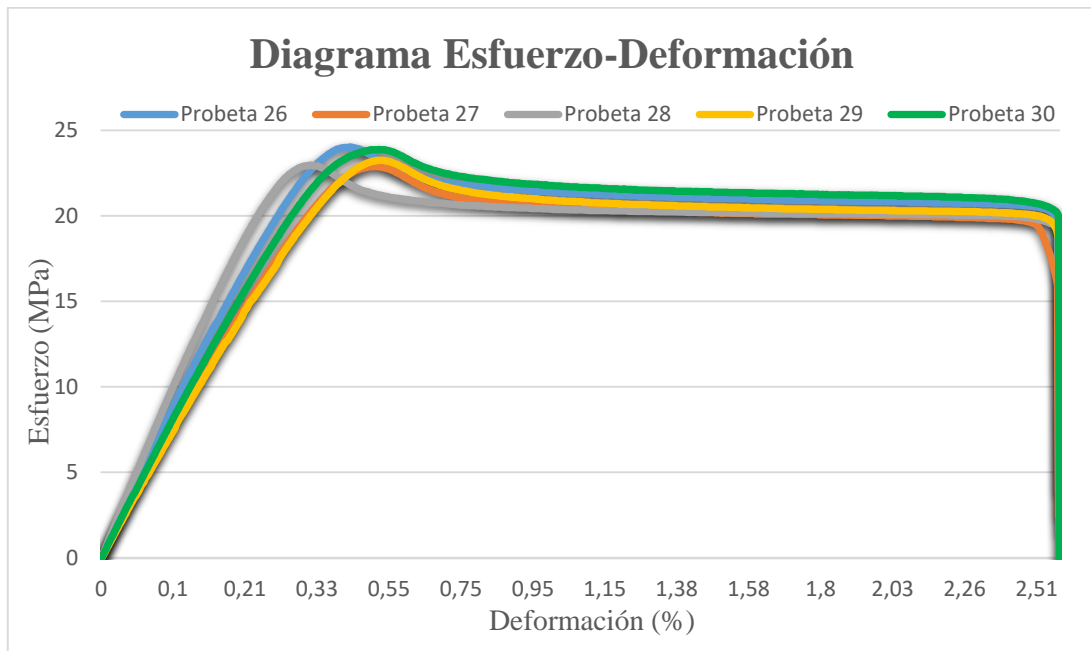


Figura 74. Diagrama esfuerzo – deformación para “ABS” impreso al 100% “mallado en octeto”.

Para el mallado en octeto los diagramas esfuerzo deformación que se muestra en la Figura 74, en esta configuración se obtuvo mejores resultados en comparación al PLA,

sin embargo, en el ABS impreso, la mayoría de probetas no se fracturo dentro de la zona calibrada, por lo tanto, la probeta 28 se tomó como representativa.

Tabla 25. Resumen de características mecánicas a tracción.

Patrón de relleno	Resistencia última a tracción (MPa)	Deformación última (%)	Módulo de elasticidad secante (MPa)	Resistencia a la rotura (MPa)	Deformación a la rotura (%)
PLA					
Rejilla	35,91	0,26	10.108,92	32,22	0,39
Triángulos	34,41	0,28	10.494,96	31,95	0,37
Octeto	35,16	0,33	12.315,05	27,83	1,06
ABS					
Rejilla	21,47	0,30	6.780,3	17,29	2,61
Triángulos	23,16	0,38	7.620,24	19,03	1,46
Octeto	22,97	0,32	8.469,36	18,95	2,60

En el caso del ABS los diagramas esfuerzo deformación de la Figura 72, Figura 73 y Figura 74 muestran un comportamiento más dúctil, presentando mayor deformación plástica antes de la rotura en comparación a los diagramas obtenidos con PLA.

En la Tabla 25, se indican los resultados alcanzados para las diferentes configuraciones de impresión para el ABS y PLA. Al comparar sus valores se observa, que los esfuerzos máximos con respecto al ABS y los patrones de relleno son 21,47MPa, 23,16 MPa y 22,97 MPa en rejilla, triángulos y octeto respectivamente, y al analizar el módulo de elasticidad la tendencia cambia, así, para una configuración en rejilla se obtuvo un módulo de elasticidad de 6.780,3 MPa, para la configuración en triángulos 7.620,24 MPa, y para la configuración en octeto de 8.469,36 MPa.

por lo tanto, se demuestra que el PLA es más resistente que el ABS y tiene mejores propiedades mecánicas de tracción.

3.3 Ensayo de Flexión

Los ensayos se llevaron a cabo bajo la norma ASTM D790-17 en el laboratorio de nuevos materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), en la máquina Tinius Olsen H25KS (Figura 75), como se mencionó anteriormente.

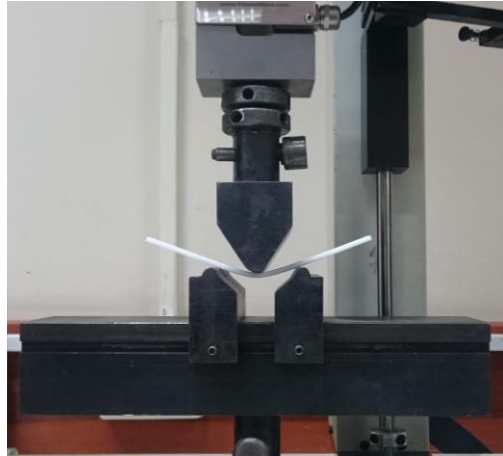


Figura 75. Máquina realizando ensayo de flexión.

En la Tabla 26 27, 28, 29, 30, y 31 se muestra los resultados obtenidos en los ensayos de flexión de las probetas impresas en PLA y ABS para los patrones de relleno rejilla, triángulos, y octeto con una densidad al 100%.

Tabla 26. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Rejilla en PLA

Material	N°	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Deformación final (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)
PLA	1	128,33	82,65	4,96	4,96	2.553,55
PLA	2	126,67	82,65	4,78	5,13	2.664,29
PLA	3	132,50	84,74	4,53	5,00	2.685,5
PLA	4	125,83	82,65	4,55	4,99	2.568,07
PLA	5	130,83	82,69	4,96	4,99	2.715,92
Promedio \bar{X}		128,83	83,08	4,76	5,01	2.637,47
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		2,80	0,93	0,21	0,07	72,53
Coefficiente de variación <i>CV</i>		2,17	1,12	4,43	1,33	2,75

En la Figura 76 se muestran las probetas en PLA con patrón de rejilla marcadas con las zonas donde irán los apoyos y la carga; y después de la realización de los ensayos a flexión.

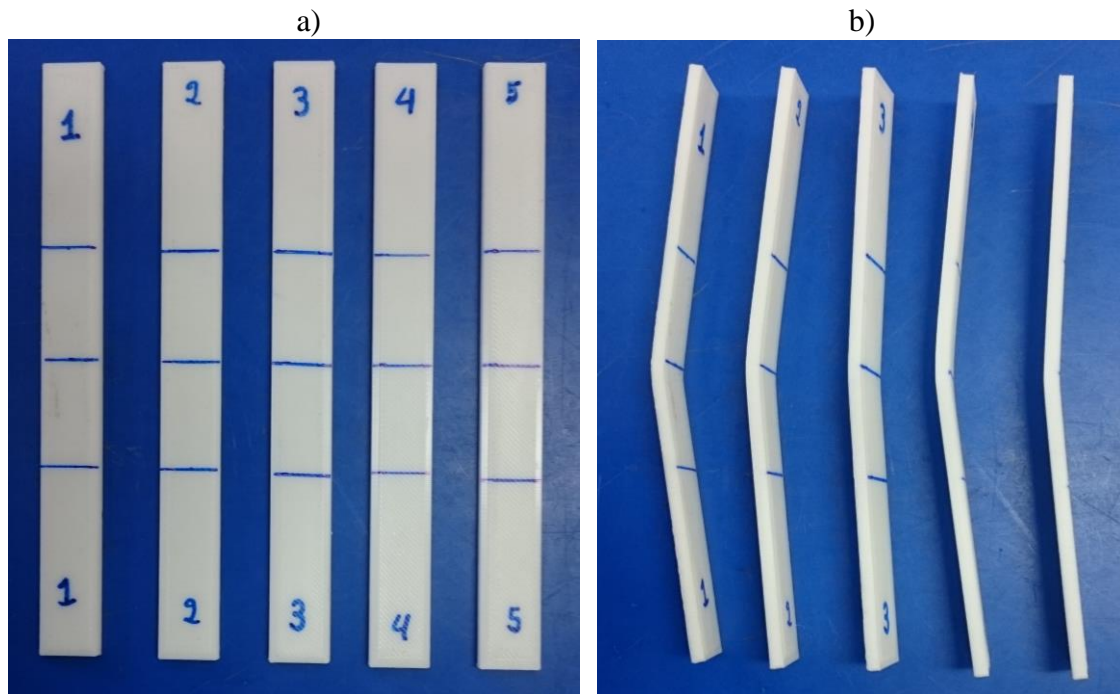


Figura 76. Probetas impresas en “PLA” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.

Tabla 27. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Triángulos en PLA

Material	N°	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Deformación final (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)
PLA	6	128,33	84,16	4,93	4,96	2.603,64
PLA	7	135,83	84,19	4,61	5,00	2.712,71
PLA	8	131,67	85,40	4,65	5,00	2.743,70
PLA	9	145,83	91,63	4,25	4,98	3.267,58
PLA	10	130,00	84,39	4,91	5,00	2.742,76
Promedio \bar{X}		134,33	85,95	4,67	4,99	2.814,08
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		7,01	3,21	0,28	0,02	259,93
Coefficiente de variación CV		5,22	3,74	5,92	0,36	9,24

En la Figura 77 se representa las probetas en PLA con patrón triángulos calibradas antes de realizar los ensayos, y la deformación luego de realizar el ensayo de flexión.

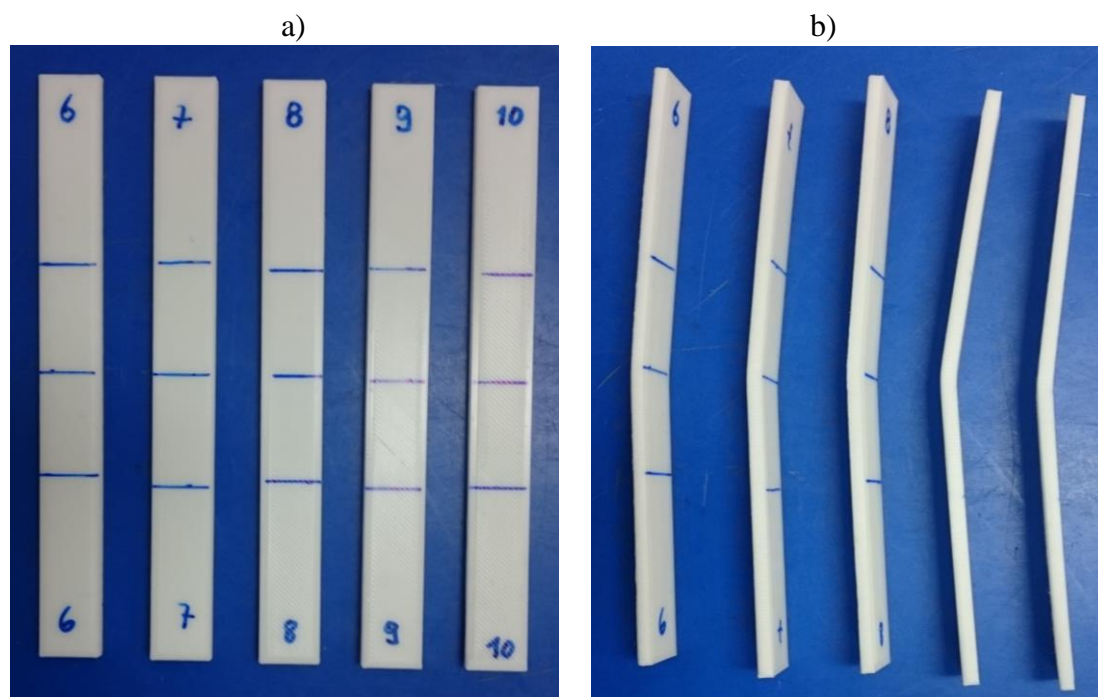


Figura 77. Probetas impresas en “PLA” con patrón de triángulos, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.

Tabla 28. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Octeto en PLA

Material	N°	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Deformación final (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)
PLA	11	133,33	86,00	4,68	4,99	2.808,09
PLA	12	135,00	86,57	4,50	5,01	2.761,07
PLA	13	127,50	84,02	4,96	5,01	2.696,40
PLA	14	130,83	85,36	4,50	5,00	2.739,69
PLA	15	130,00	85,53	4,70	4,98	2.626,38
Promedio \bar{X}		131,33	85,50	4,67	5,00	2.726,33
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		2,92	0,95	0,19	0,01	68,84
Coefficiente de variación CV		2,23	1,11	4,05	0,26	2,53

En la Figura 78 se muestran las probetas en PLA con patrón octeto listas para ensayar, y luego de ser ensayadas.

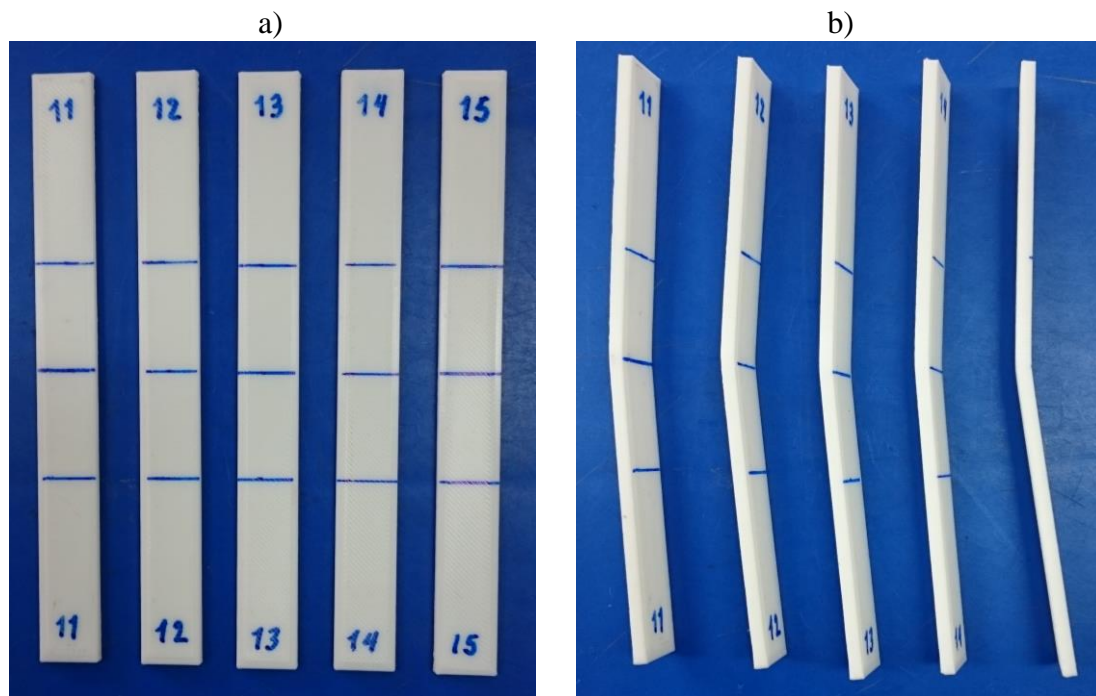


Figura 78. Probetas impresas en “PLA” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.

Tabla 29. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Rejilla en ABS

Material	N°	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Deformación final (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)
ABS	16	101,67	49,20	4,86	4,95	1.441,64
ABS	17	101,67	49,98	4,76	4,97	1.465,86
ABS	18	102,50	49,28	4,83	5,00	1.445,37
ABS	19	97,50	46,99	4,83	4,97	1.384,28
ABS	20	101,67	49,61	4,85	4,96	1.485,33
Promedio \bar{X}		101,00	49,01	4,83	4,97	1.444,50
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		1,99	1,17	0,04	0,02	37,94
Coficiente de variación CV		1,97	2,39	0,81	0,38	2,63

En la Figura 79 se presentan las probetas en ABS con patrón de rejilla que fueron sometidas al ensayo de flexión.

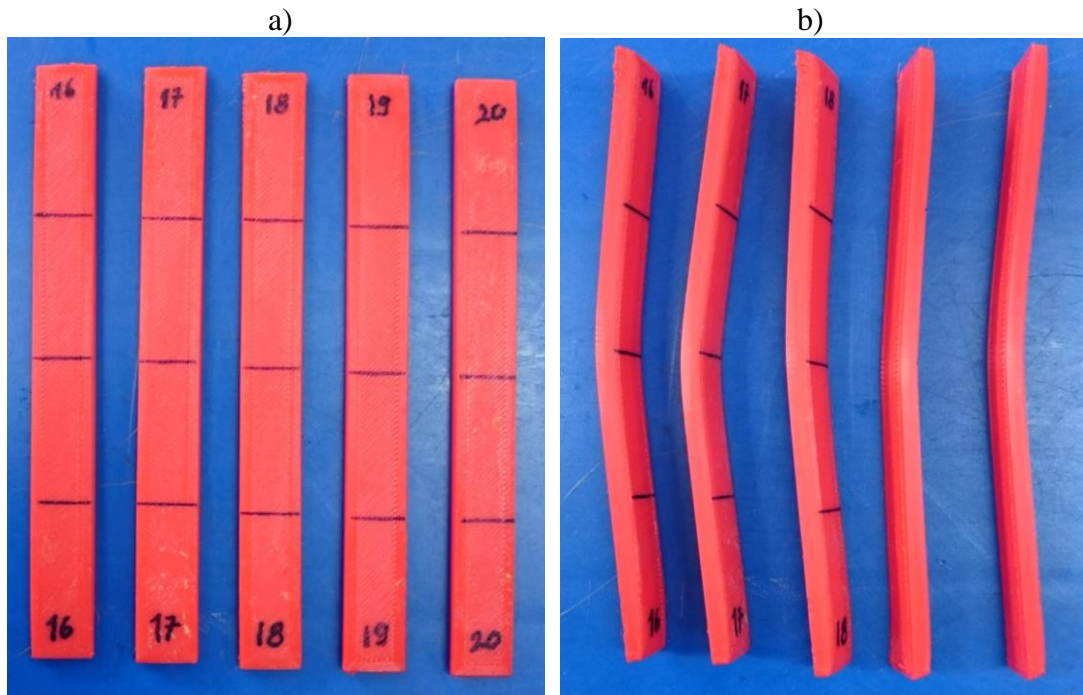


Figura 79. Probetas impresas en “ABS” con patrón de rejilla, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.

Tabla 30. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Triángulos en ABS

Material	N°	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Deformación final (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)
ABS	21	103,33	49,84	4,93	4,96	1.497,81
ABS	22	101,67	49,28	4,70	4,89	1.493,48
ABS	23	104,17	49,77	4,76	4,97	1.536,00
ABS	24	102,50	48,34	4,62	4,97	1.517,3
ABS	25	102,50	48,34	4,62	4,97	1.517,3
Promedio \bar{X}		102,83	49,11	4,73	4,95	1.512,38
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		0,95	0,74	0,13	0,03	17,15
Coficiente de variación CV		0,92	1,50	2,72	0,71	1,13

La Figura 80, muestra la calibración y deformación de las probetas de ABS con patrón de triángulos que fueron usadas en el ensayo de flexión.

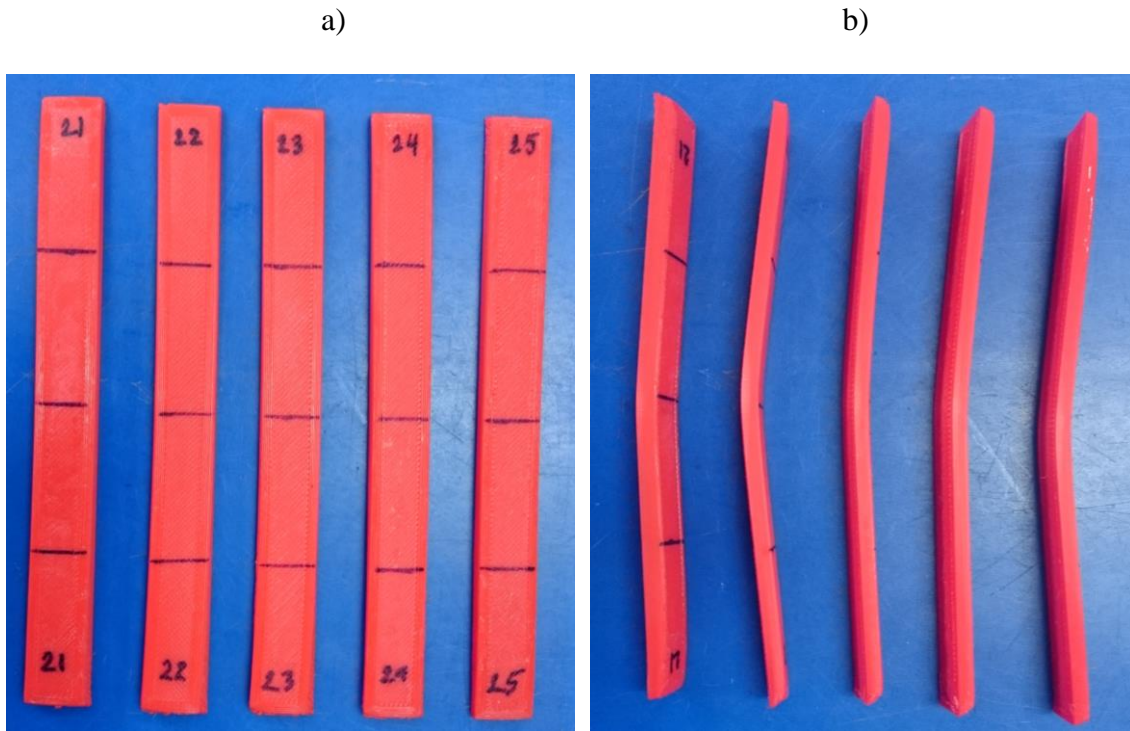


Figura 80. Probetas impresas en “ABS” con patrón de triángulos, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.

Tabla 31. Resultados de ensayo de flexión de probetas con patrón Octeto en ABS

Material	N°	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Deformación final (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)
ABS	26	125,83	61,41	4,70	4,93	1.622,31
ABS	27	99,17	47,41	4,95	5,00	1.400,92
ABS	28	103,33	48,87	4,91	4,99	1.452,81
ABS	29	99,51	48,20	4,89	4,95	1.376,21
ABS	30	101,67	48,70	4,92	4,96	1.461,52
Promedio \bar{X}		105,90	50,92	4,87	4,97	1.462,75
Desviación estándar $S_{(N-1)}$		11,27	5,89	0,10	0,03	96,01
Coefficiente de variación CV		10,64	11,57	2,04	0,58	6,56

Finalmente, la Figura 81 se muestra las probetas de ABS con patrón octeto que se usaron para el ensayo a flexión.

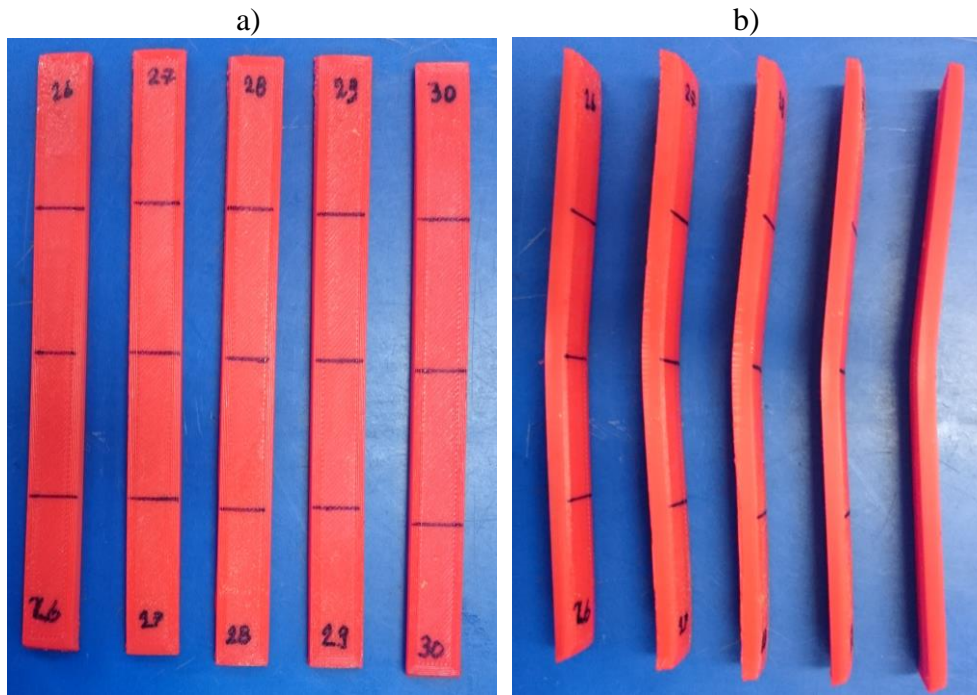


Figura 81. Probetas impresas en “ABS” con patrón octeto, a) calibradas para someter a ensayo de flexión y b) luego de ser ensayadas.

3.3.1 Diagramas esfuerzo deformación obtenidos en los diferentes ensayos a flexión.

3.3.1.1 Diagramas esfuerzo deformación a flexión para PLA impreso.

El ensayo de flexión también proporciona un diagrama de esfuerzo deformación que se muestran a continuación para realizar el análisis de los resultados obtenidos.

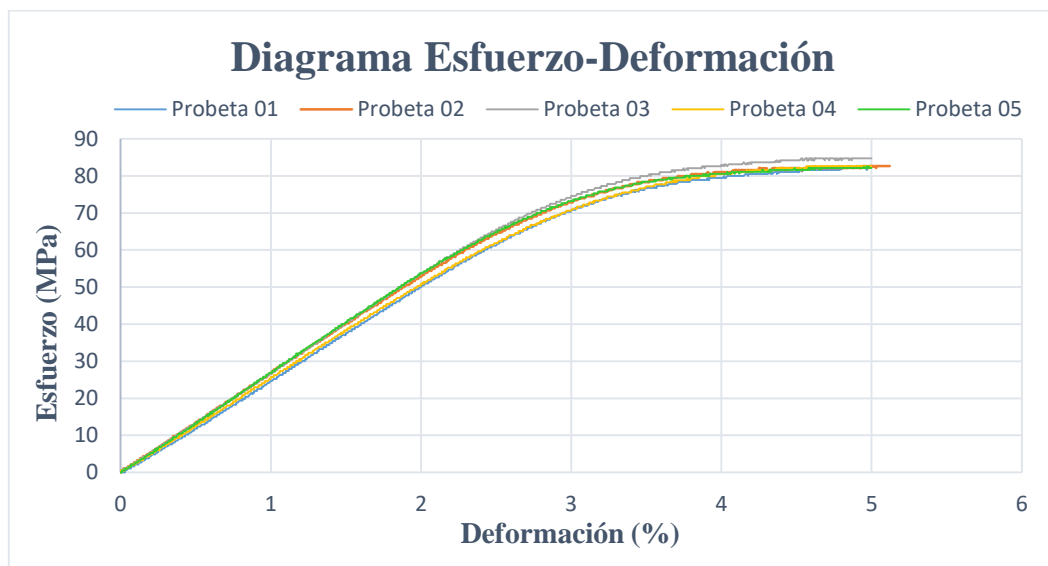


Figura 82. Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “PLA” impreso al 100% “mallado en rejilla”.

La Figura 82 muestra los diagramas esfuerzo deformación a flexión correspondientes a las probetas de PLA con mallado en rejilla, de manera similar al ensayo a tracción, se elige la probeta más representativa, la cual, debe cumplir la condición de estar lo más cercana al promedio ya sea por exceso o por defecto, por lo tanto, para este caso la probeta seleccionada es la Probeta 02 de color naranja en el diagrama.

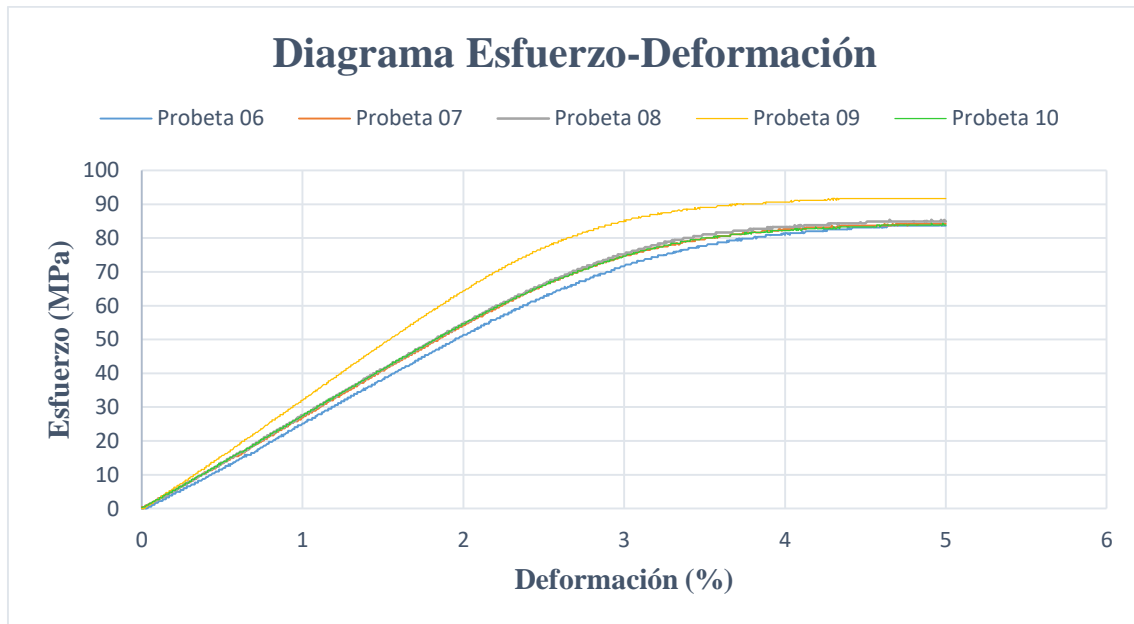


Figura 83. Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “PLA” impreso al 100% “mallado en triángulos”.

Para el caso del PLA con mallado en triángulos los diagramas esfuerzo deformación se encuentran en la Figura 83, donde la probeta elegida como representativa es la probeta 08, que en el diagrama se encuentra en color gris, aunque es difícil de apreciar debido a la pequeña diferencia que existe entre los diagramas.

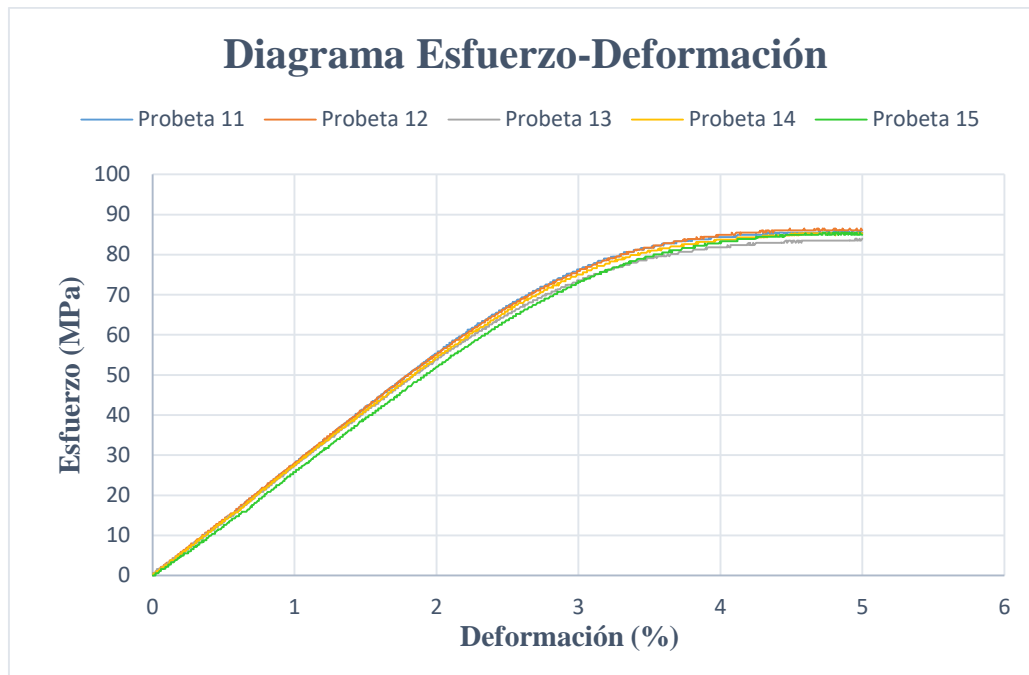


Figura 84. Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “PLA” impreso al 100% “mallado en octeto”.

En la Figura 84, se observa los diagramas esfuerzo deformación a flexión de las probetas de PLA con mallado en octeto, los valores son similares en esta configuración para las diferentes probetas ensayadas, sin embargo, con la ayuda de la Tabla 28, la probeta 14 es la más representativa.

Luego del estudio de los diagramas esfuerzo deformación por cada tipo de mallado en PLA para los ensayos de flexión, se puede analizar cómo influye la configuración de estos patrones en las características mecánicas de las probetas. El patrón de triángulos es el que mejor resistencia última a la flexión obtuvo 85,40 MPa, además el patrón de octeto obtuvo 85,36 MPa que son los patrones con valores similares, por otra parte, no fue el caso del patrón de rejilla debido a que es el que menor resistencia obtuvo con un valor de 82,65 MPa que a pesar de ser el patrón más usado por los usuarios se ve superado por los otros patrones al tener mejores características.

A continuación, se muestran los diagramas de esfuerzo deformación para el ABS:

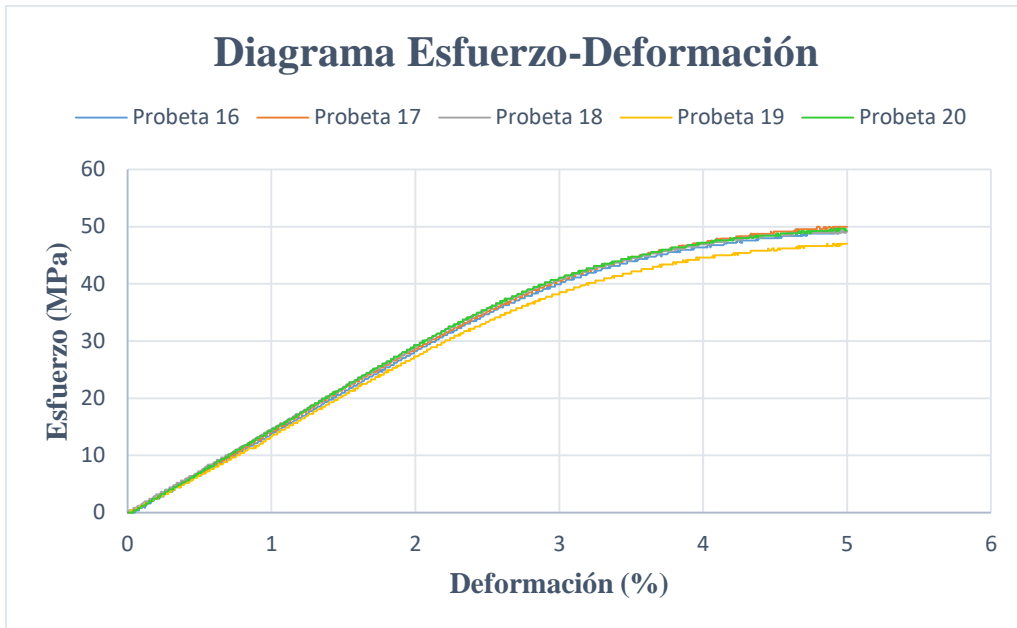


Figura 85. Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “ABS” impreso al 100% “mallado en rejilla”.

En la Figura 85, se muestra los diagramas esfuerzo deformación de las probetas en ABS con mallado en rejilla, como se puede apreciar siguen similares trayectorias por lo tanto los valores son semejantes, después del respectivo análisis se selecciona a la probeta 16 que se encuentra de color azul como representativa.

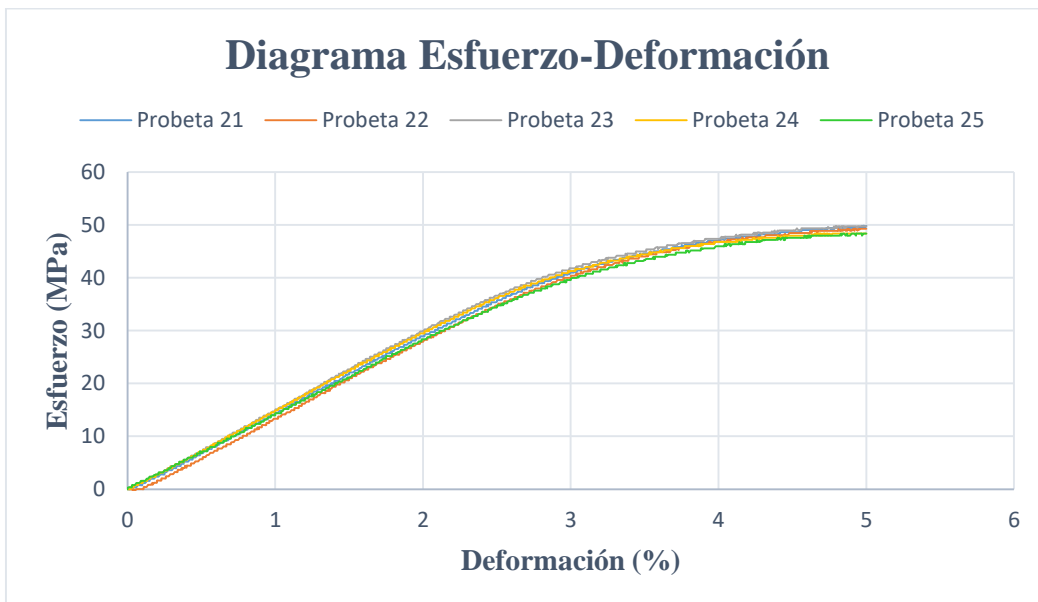


Figura 86. Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “ABS” impreso al 100% “mallado en triángulos”.

La Figura 86 muestra los diagramas esfuerzo deformación de las probetas en ABS con mallado en triángulos, que al igual que en el patrón anterior sus valores son similares y los diagramas de igual manera, la probeta representativa en este mallado es la probeta 24.

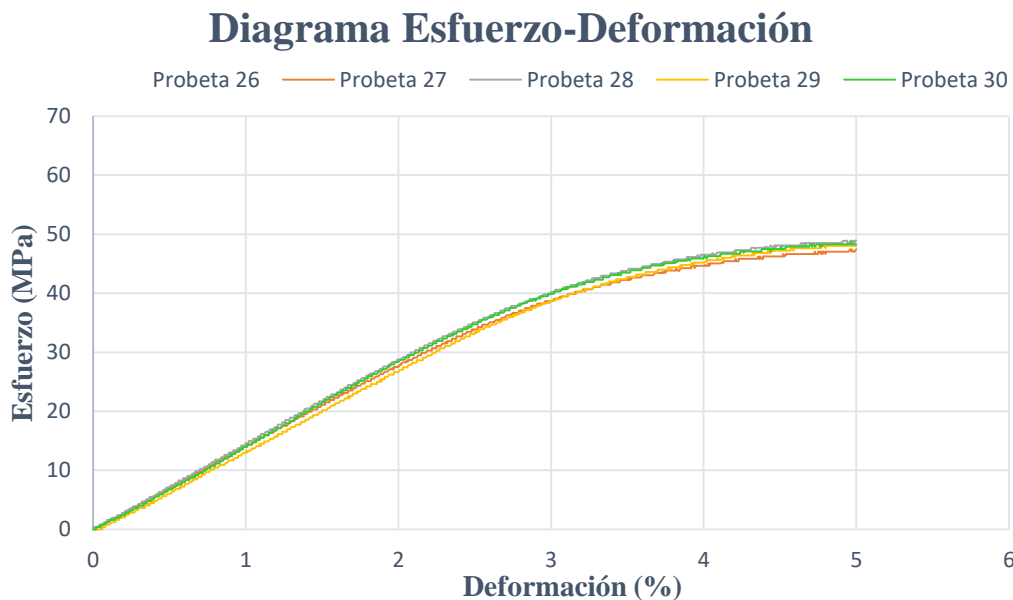


Figura 87. Diagrama esfuerzo – deformación de ensayo a flexión para “ABS” impreso al 100% “mallado en octeto”.

La Figura 87 muestra los diagramas esfuerzo deformación para probetas de ABS con mallado en octeto, donde la probeta representativa es la probeta 27 que se encuentra de color naranja.

Luego de analizar cada probeta con su respectivo diagrama de esfuerzo deformación, se puede constatar cómo influye el patrón de relleno. Con la configuración de patrón en rejilla se obtuvo la mejor resistencia a la flexión con 49,20 MPa seguido por el patrón de triángulos con 48,34 MPa y finalmente el patrón octeto con 47,41 MPa.

Sin embargo, si se compara los resultados obtenidos en la Tabla 32, se observa que las propiedades mecánicas a flexión para el PLA y ABS impresos con diferentes para configuraciones diferentes, y obteniéndose mejores resultados para la configuración en triángulos.

Tabla 32. Resumen de características mecánicas a flexión.

Patrón de relleno	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Deformación última (%)	Deformación final (%)	Módulo elástico a flexión (MPa)
PLA					
Rejilla	126,67	82,65	4,78	5,13	2.664,29
Triángulos	131,67	85,40	4,65	5,00	2.743,70
Octeto	130,83	85,36	4,50	5,00	2.739,69
ABS					
Rejilla	101,67	49,20	4,86	4,95	1.441,64
Triángulos	102,50	48,34	4,62	4,97	1.517,3
Octeto	99,17	47,41	4,95	5,00	1.400,92

Además, se debe tomar en consideración que las probetas de flexión en PLA y ABS no sufrieron ninguna fractura, se ensayaron hasta el 5% de deformación y se detuvo el ensayo como indica la norma, por lo tanto, todas las probetas ensayados tuvieron un tipo de falla de deformación sin rotura.

3.4 Simulación

Luego de los resultados que se adquiere en los ensayos mecánicos, se realizó el análisis de elementos finitos que consiste en simular las probetas utilizadas en los ensayos aplicando las cargas para verificar y comparar los resultados.

Se inicia colocando las condiciones de la simulación como son: el material, cargas aplicadas, sujeciones y malla.

Inicialmente, se debe verificar que el complemento de *solidworks simulation* se encuentre activo para realizar un análisis estático configurando las condiciones antes mencionadas como se muestra en la Figura 88.

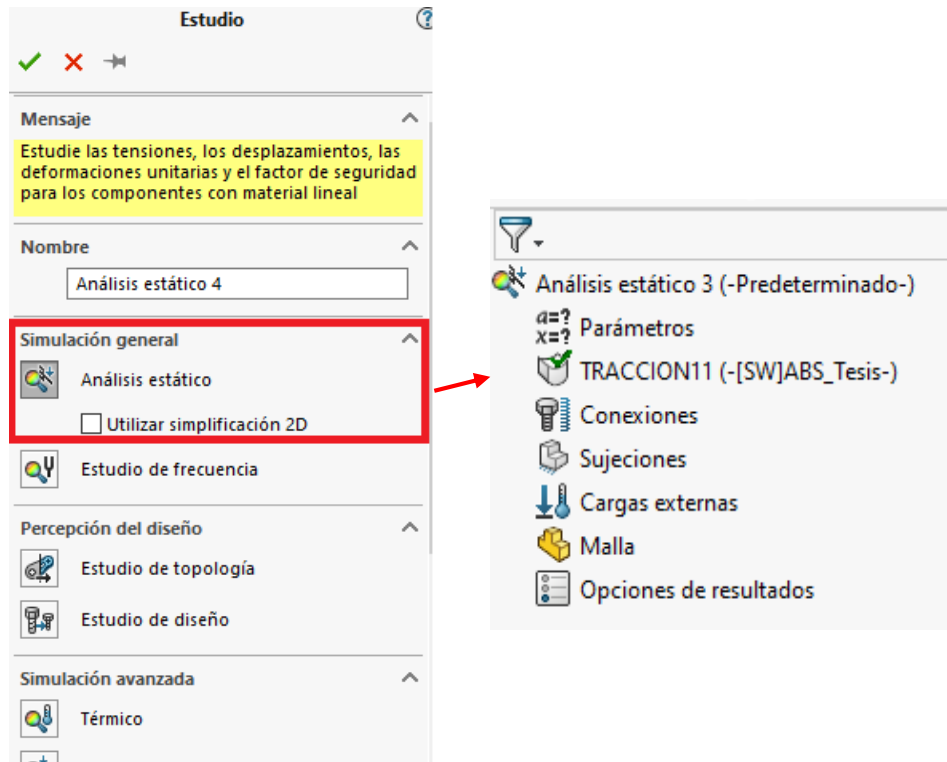


Figura 88. Condiciones del análisis estático.

En la Tabla 33, se representa las características del material utilizado en la impresión de probetas el cual pertenece a la sección de materiales personalizados, aunque se deriva de un material ya existente en la biblioteca de materiales. Para la simulación se ingresa los valores obtenidos de los ensayos.

Tabla 33. Propiedades del material para la simulación.

Propiedad	Valor en PLA	Valor en ABS	Unidad
Módulo elástico	10,11	7,62	GPa
Coefficiente de Poisson [54]	0,344	0,36	N/D
Densidad de masa	999,32	992,281	kg/m ³
Límite a tracción	35,91	23,16	N/mm ²

Además, para garantizar que los resultados de la simulación sean similares a los resultados obtenidos mediante los ensayos, se realizó un diagrama de convergencia variando el mallado de la probeta para obtener cual será el óptimo.

En la Tabla 34, se presenta los tamaños de malla utilizados, que van desde 1 a 3 mm.

Tabla 34. Tamaños utilizados en la malla

Tamaño del elemento finito (tetraedro) (mm)	N° de Nodos	N° de Elementos	Esfuerzo Máximo (MPa)
1	59.149	38.202	38,008
1,5	21.785	13.396	37,388
2	10.422	6.111	37,358
2,5	5.945	3.296	36,779
3	3.421	1.842	36,270

La simulación se realiza considerando que la probeta es totalmente sólida, que el material utilizado es isotrópico, y se toma en consideración las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción y de flexión para las diferentes configuraciones de impresión a analizar, además la geometría que se utiliza es la obtenida después de la impresión de las probetas y no la geometría ideal que se encuentra en la norma. En la

Figura 89, se observa la convergencia de la malla con respecto al esfuerzo máximo dependiendo del número de elementos del mallado y al tamaño global de la malla; el tiempo que tarda en simular va entre los 4 y 5 segundos por lo que no es un valor tan significativo que pueda ocasionar problemas en la simulación. Los valores convergen al utilizar una malla con tamaño global de 1,5 y 2 mm, por lo tanto, se realizó las simulaciones con un tamaño global de la malla de 1,5 mm.

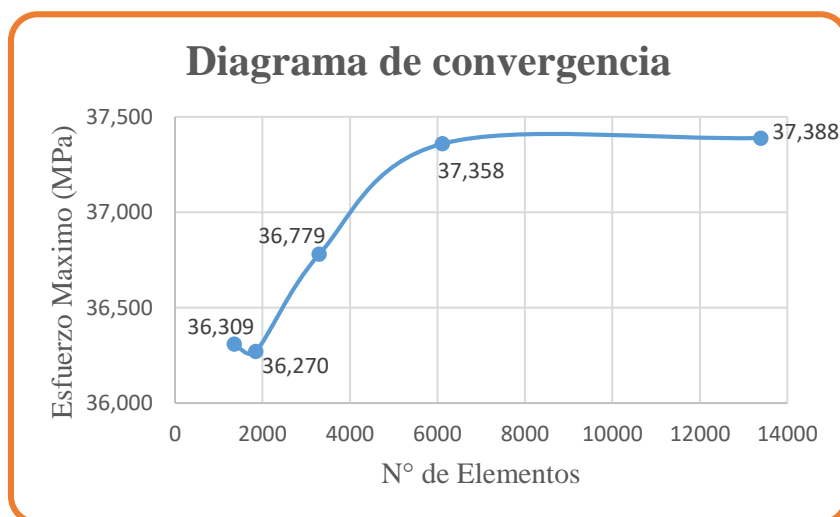


Figura 89. Representación de convergencia de la malla.

3.4.1 Simulación de los ensayos a tracción mediante software

Se realizó la simulación respectiva para cada tipo de patrón utilizando los parámetros que se muestran en la siguiente Tabla 35.

Tabla 35. Parámetros para simulación de ensayo a tracción.

Patrón de relleno	Carga última de tracción (N)	Tamaño de elemento de la malla (mm)	Número de elementos	Número de nodos
PLA				
Rejilla	820	1,5	13.396	21.785
Triángulos	793,33	1,5	13.506	21.950
Octeto	798,33	1,5	13.442	21.888
ABS				
Rejilla	627,5	1,5	13.984	22.569
Triángulos	678,43	1,5	14.187	22.890
Octeto	685,83	1,5	14.238	22.959

Para simular el ensayo a tracción se realizó
Luego de configurar los parámetros de simulación se obtienen los siguientes resultados:

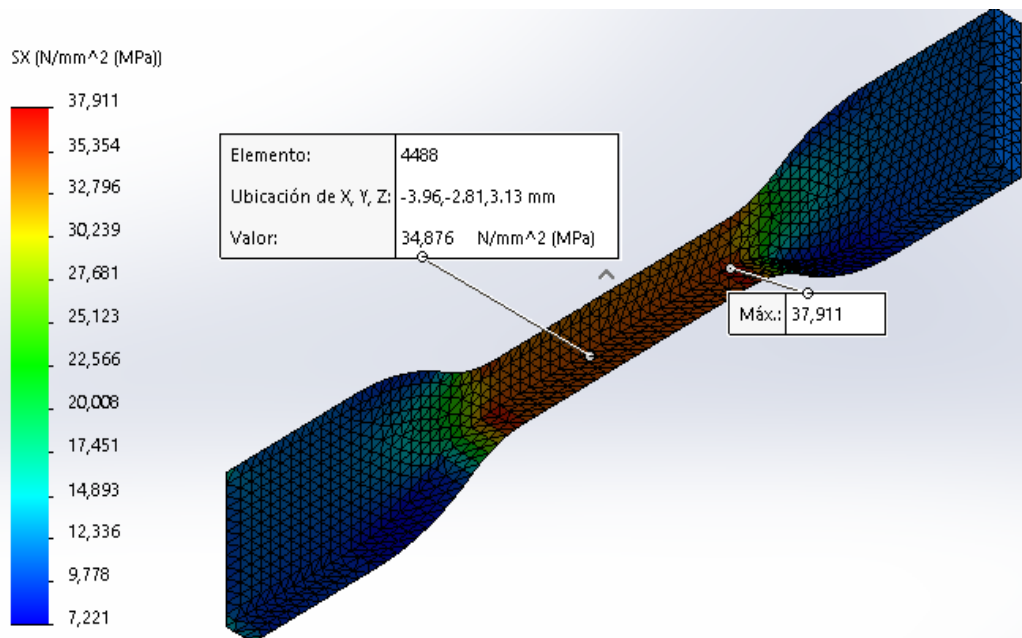


Figura 90. Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en rejilla al 100%.

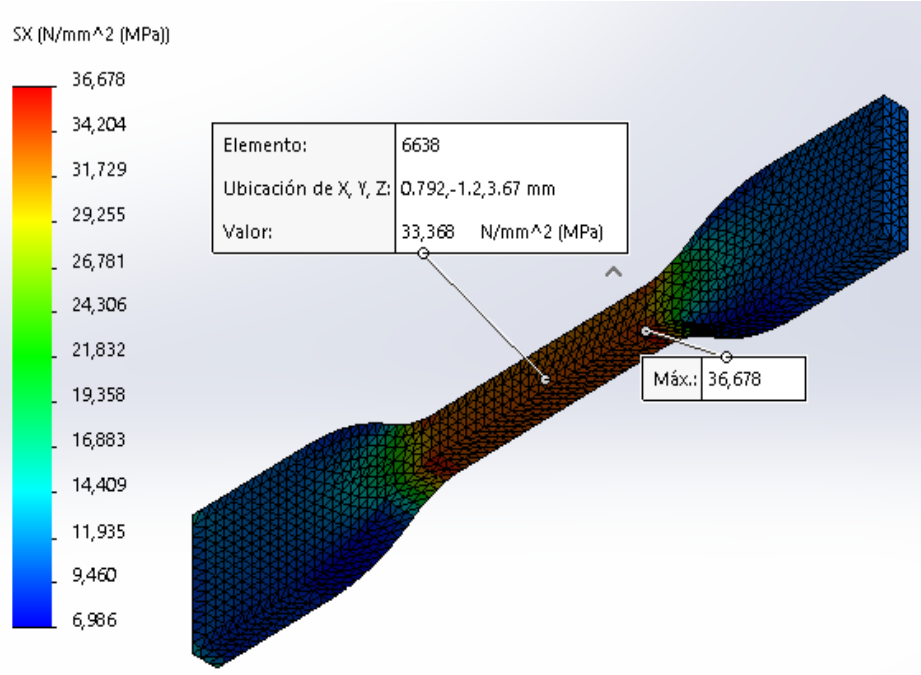


Figura 91. Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en triángulos al 100%.

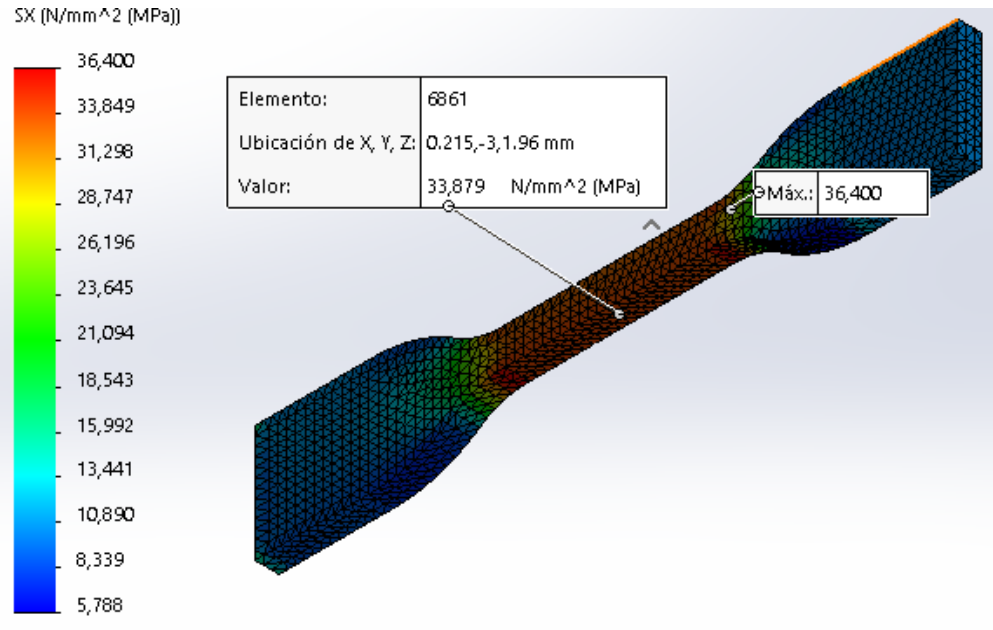


Figura 92. Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en octeto al 100%.

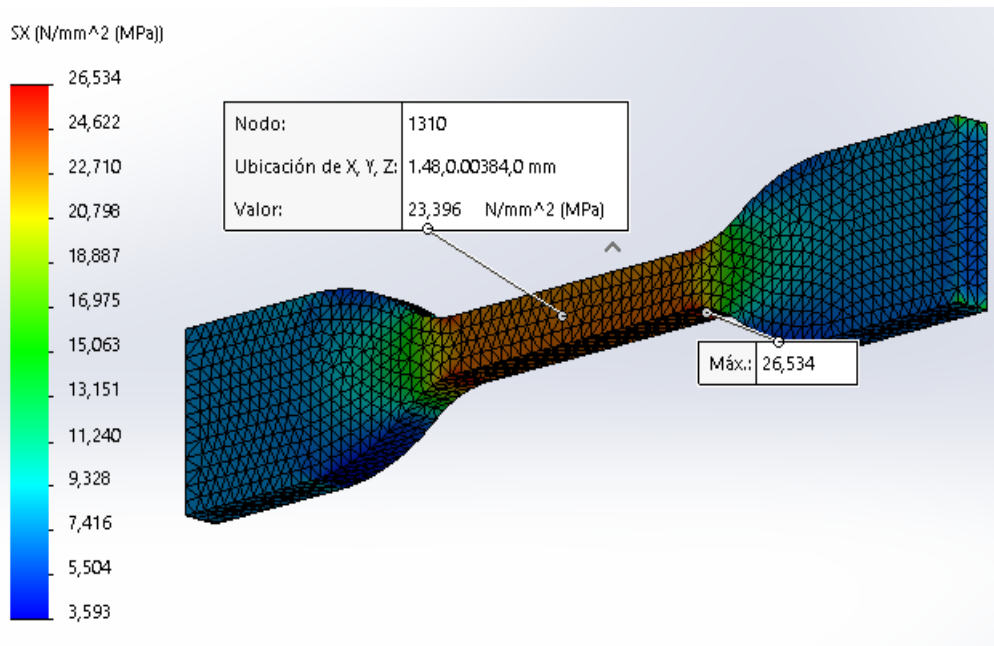


Figura 93. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en rejilla al 100%.

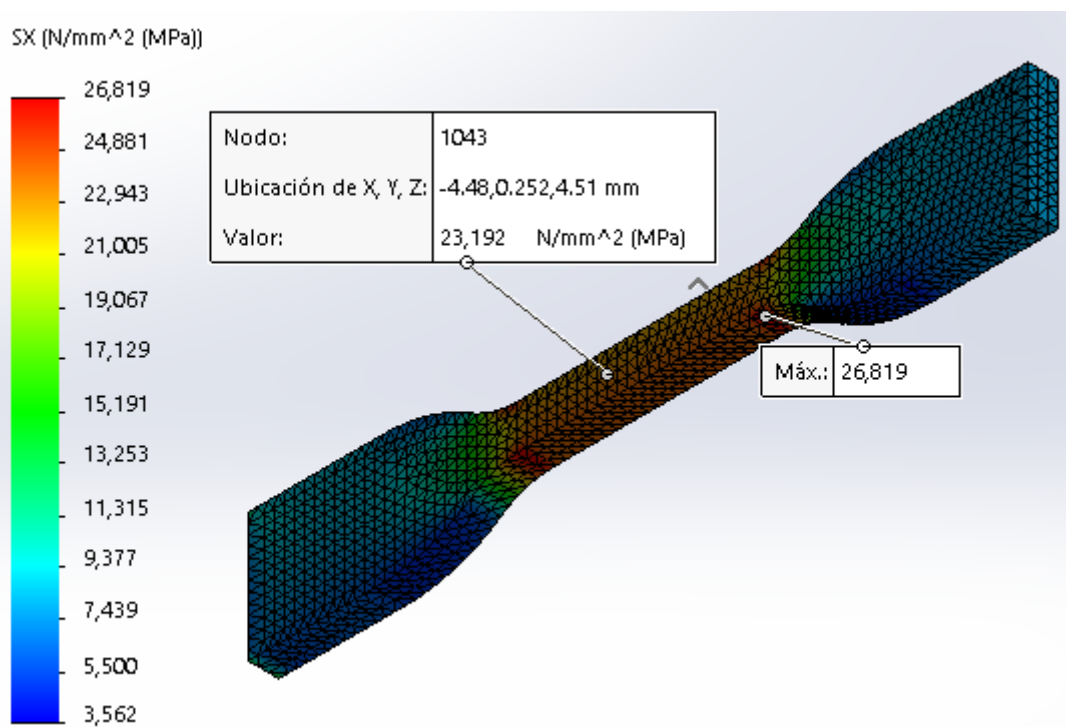


Figura 94. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en triángulos al 100%.

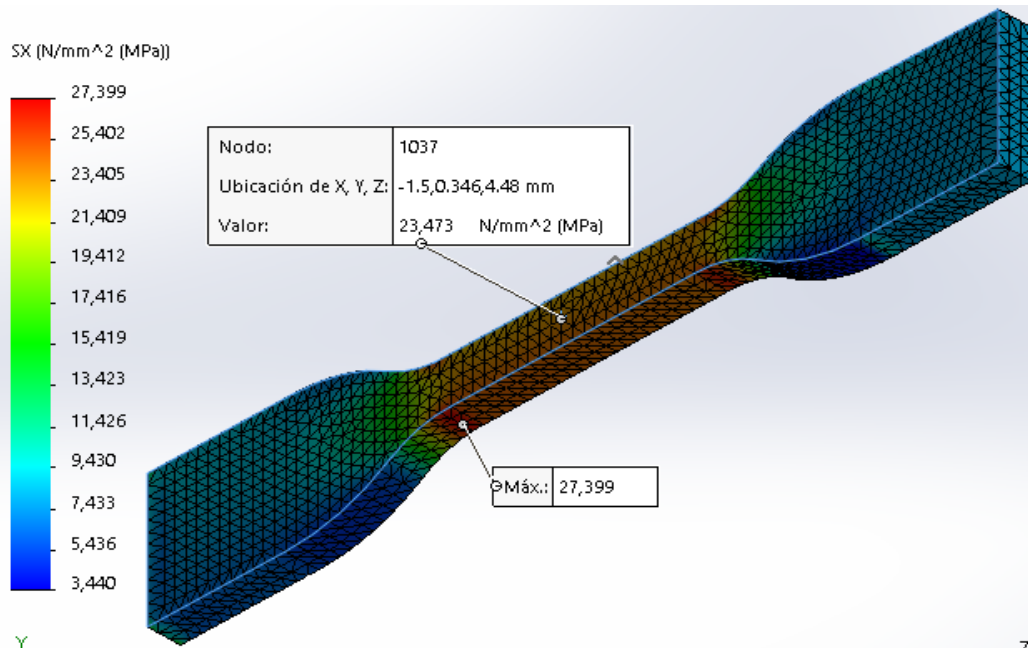


Figura 95. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en octeto al 100%.

Como se muestra en las Figura 90-95 los esfuerzos encontrados mediante simulación deben ser similares a los resultados de ensayos mecánicos, en la Tabla 36 se muestra el porcentaje de error y la comparación entre ambos análisis.

Tabla 36. Resumen de resultados de simulación vs ensayos mecánicos a tracción.

Patrón de relleno	Resistencia última de ensayos mecánicos (MPa)	Resistencia última de elementos finitos (MPa)	Error (%)	Deformación unitaria de ensayos mecánicos	Deformación unitaria de elementos finitos	Error (%)
PLA						
Rejilla	35,91	34,876	3%	0,0026	0,0029	12%
Triángulos	34,41	33,368	3%	0,0028	0,0031	11%
Octeto	35,16	33,879	4%	0,0033	0,0033	0%
ABS						
Rejilla	21,47	23,396	9%	0,003	0,003	0%
Triángulos	23,16	23,192	0,14%	0,0038	0,0035	8%
Octeto	22,97	23,473	2%	0,0032	0,0031	3,13%

3.4.2 Elementos finitos para flexión

De manera similar, para la simulación mediante software de los ensayos a flexión, se utiliza los datos de la Tabla 32 por cada patrón de relleno. El material es el mismo que

se utiliza para los ensayos a tracción. Se utilizó un mallado de viga en el cual se analiza la convergencia con respecto utilizando los tamaños de elemento global que se usó en los ensayos a tracción dando como resultado lo siguiente. En la Tabla 37 se muestran las condiciones para la simulación de ensayo de flexión.

Tabla 37. Parámetros para la simulación de ensayo de flexión

Patrón de relleno	Carga última de tracción (N)	Distancia entre apoyos	Tamaño de elemento de la malla (mm)	Número de elementos	Número de nodos
PLA					
Rejilla	126,67	45,20	1,5	84	169
Triángulos	131,67	45,28	1,5	85	172
Octeto	130,83	45,12	1,5	86	173
ABS					
Rejilla	101,67	49,61	1,5	85	172
Triángulos	102,50	62,16	1,5	86	173
Octeto	99,17	60,08	1,5	86	173

Luego de realizar todas las configuraciones de los diferentes escenarios de simulación se consigue los siguientes resultados:

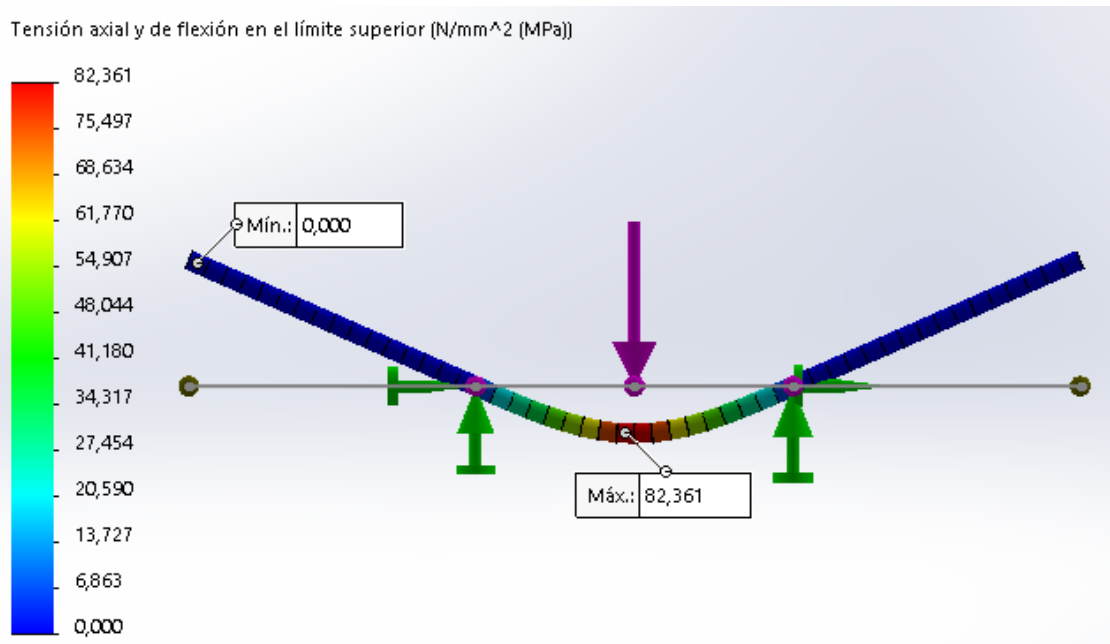


Figura 96. Simulación a flexión para PLA de la configuración de impresión en rejilla al 100%.

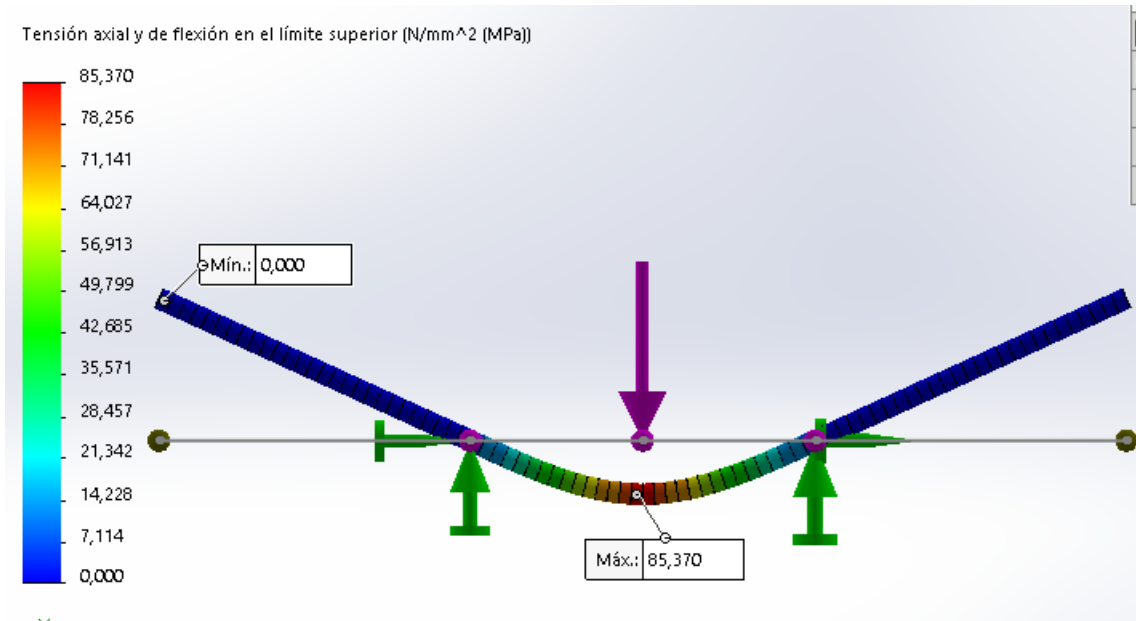


Figura 97. Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en triángulos al 100%.

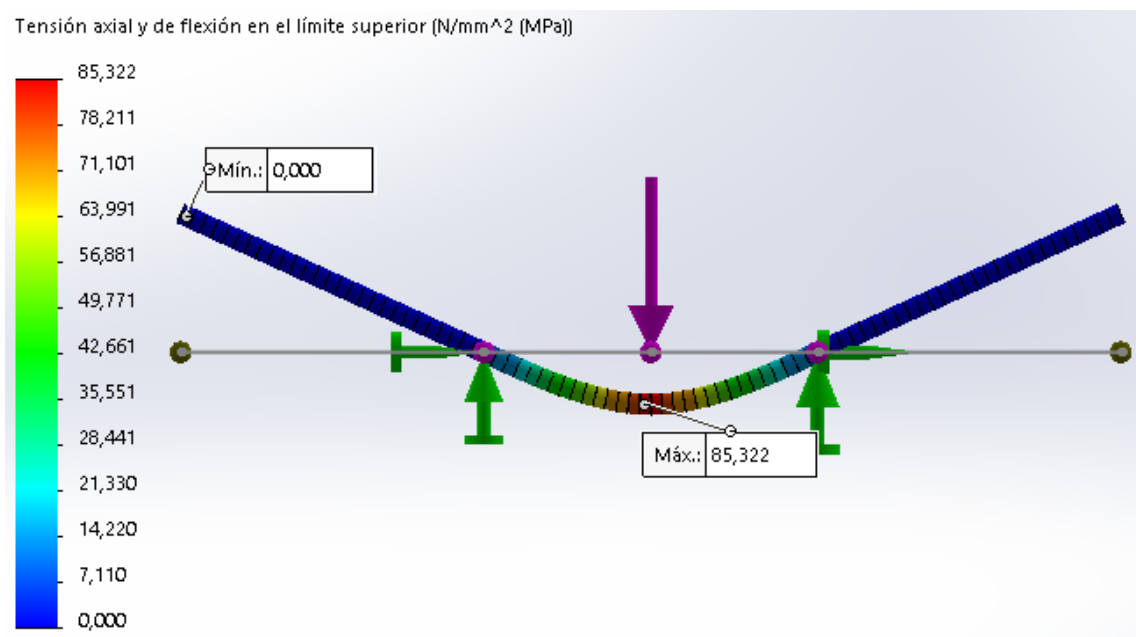


Figura 98. Simulación a tracción para PLA de la configuración de impresión en octeto al 100%.

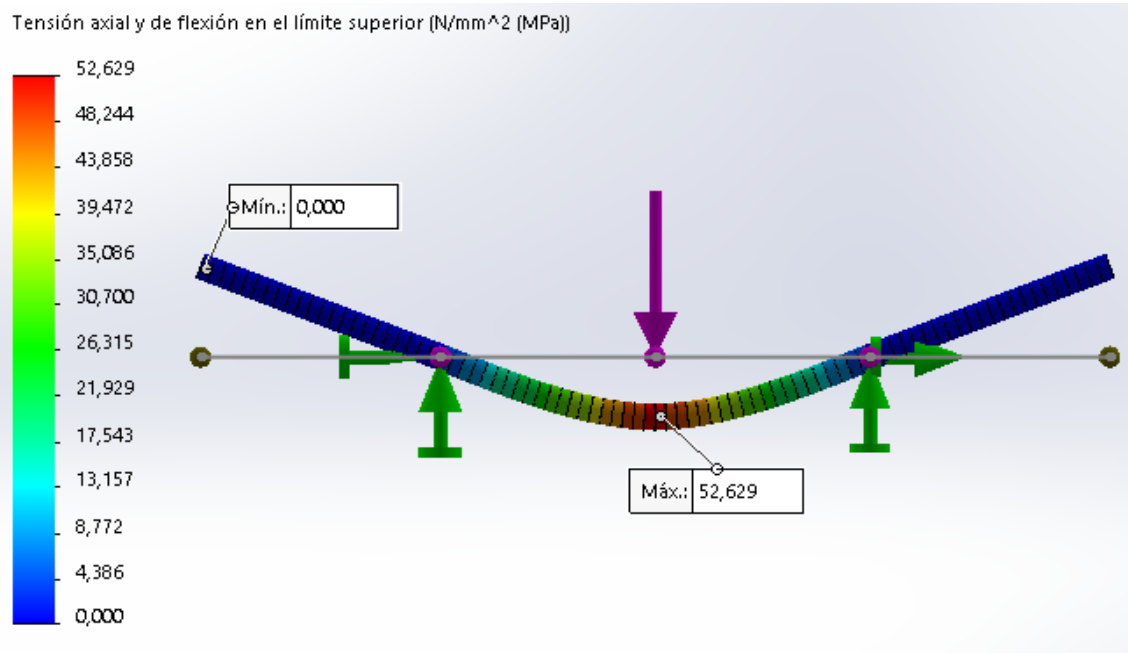


Figura 99. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en rejilla al 100%.

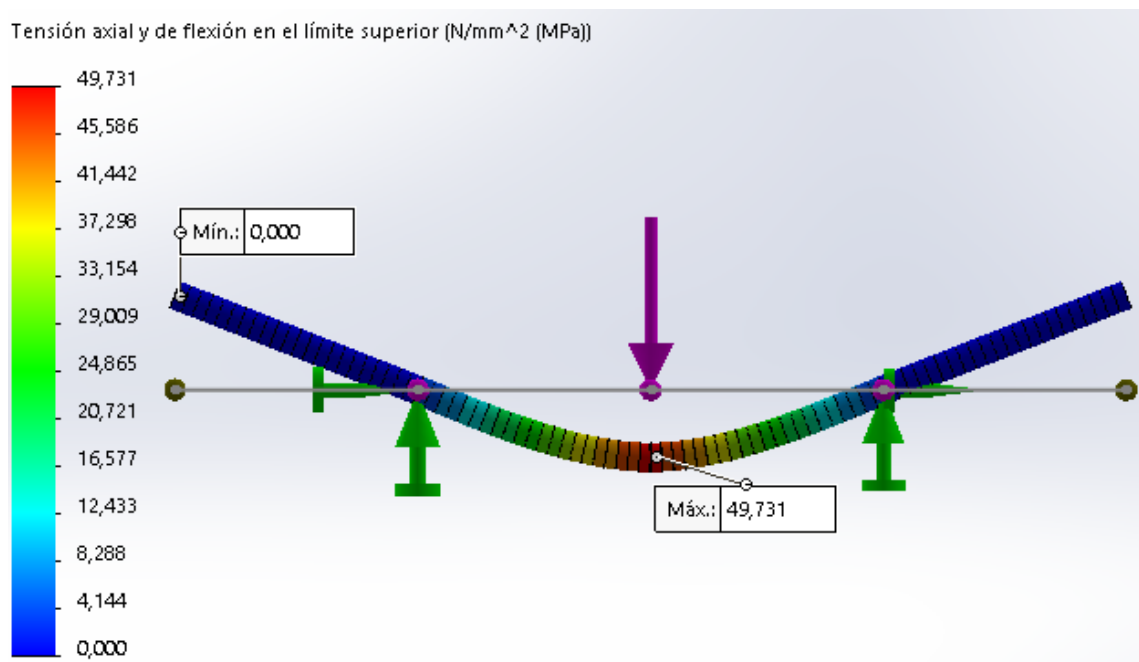


Figura 100. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en triángulos al 100%.

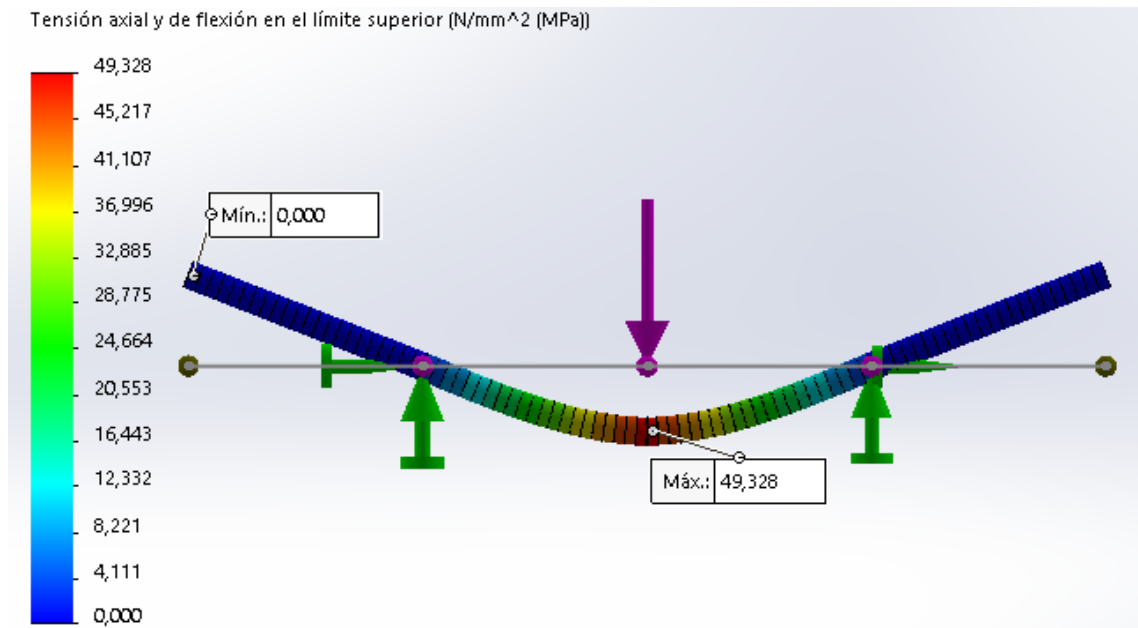


Figura 101. Simulación a tracción para ABS de la configuración de impresión en octeto al 100%.

Las Figura 96-101 muestran los esfuerzos que se generan mediante la simulación del ensayo de flexión, para el material PLA y ABS respectivamente. Ahora se compara los resultados y se representa en la Tabla 38 para verificar que porcentaje de error existe entre ambos análisis.

Tabla 38. Resumen de resultados de simulación vs ensayos mecánicos a flexión.

Patrón de relleno	Resistencia última a flexión de ensayos mecánicos (MPa)	Resistencia última de elementos finitos (MPa)	Error (%)
PLA			
Rejilla	82,65	82,361	0,35%
Triángulos	85,4	85,37	0,04%
Octeto	85,36	85,32	0,04%
ABS			
Rejilla	49,2	52,629	7%
Triángulos	48,34	49,731	3%
Octeto	47,41	49,328	4%

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El parámetro que se analizó para ver la influencia en las propiedades mecánicas es el patrón de relleno que mediante ensayos a tracción con Norma ASTM D638-14 y flexión con norma ASTM D790-17 se determinó las características mecánicas del PLA y ABS.
- La elaboración de las probetas mediante el diseño CAD y la impresión 3D, se realizó sin problemas en el caso de la impresión en PLA, debido a que este material no necesita de una cama caliente o que tenga un valor de temperatura para su mejor adhesión capa a capa y, por lo tanto, las probetas impresas tienen buen acabado superficial y su geometría no se vio afectada.
- En el caso del ABS se tiene problemas debido a la complejidad que ocasiona el material al momento de ser impreso en 3D, ya que necesita varios controles como es la temperatura de la cama o plataforma de impresión, control de temperatura ambiental y adhesión de la primera capa mediante laca o algún liquido adherente debido a la presencia del fenómeno de warping y de expansión del material, por lo tanto, se tiene variación en la geometría de las mismas.
- La resistencia última a tracción es mayor cuando se utiliza la configuración de patrón de relleno en rejilla para el PLA, y para el ABS la configuración que brinda la mayor resistencia última a tracción es el patrón en triángulos.
- Al analizar los resultados alcanzados respecto a la resistencia última a la flexión se determinó, que, para la configuración del patrón de relleno en

triángulos, se obtuvo mejores resultados para el PLA, mientras que para el ABS la configuración en rejilla alcanzó mejores resultados.

- Si comparamos las propiedades mecánicas obtenidas en PLA y ABS podemos determinar que el PLA presenta las mejores propiedades mecánicas en tracción, y con respecto a flexión el PLA supero en un 50 % al ABS.
- En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que los parámetros de impresión utilizados (Tabla 13) son los óptimos para realizar piezas o diseños que requieran el 100% de densidad de relleno para cumplir la función de otras piezas mecánicas, aunque esto requiera de un tiempo de impresión mayor.
- Mediante las simulaciones se determinó los esfuerzos máximos correspondientes a las probetas de tracción, lo cual, permite concluir que la geometría que proporciona la norma ASTM D638 no garantiza al 100% que la probeta se fracture de forma adecuada debido a que existe un concentrador de esfuerzos antes de la zona calibrada, lo que justifica que algunas probetas se fracturen fuera de la misma.
- En la simulación de los ensayos mecánicos a tracción para el PLA impreso, se obtuvo el menor margen de error con respecto a los esfuerzos máximos, mientras que, en la simulación de los ensayos a tracción del ABS impreso, obtuvo un mayor error respecto a los esfuerzos máximos de tracción en la probeta impresa con patrón de impresión en rejilla.
- En las simulaciones del ensayo de flexión en PLA y ABS impresos, el error fue menor en la configuración de impresión en triángulos, mientras que para la configuración en rejilla se tuvo mayor error. Por lo tanto, gracias a la simulación se garantiza que los ensayos mecánicos se realizaron bajo normas

estandarizadas y que los resultados obtenidos se pueden utilizar para realizar prototipos.

Recomendaciones

- ✓ Para la impresión de ABS se recomienda utilizar una impresora que conste con las características necesarias para una correcta impresión, para que no afecte la calidad de las probetas.
- ✓ Se recomienda que, al momento de realizar los ensayos, se pueda controlar la temperatura ambiental para cumplir con todos los parámetros que se estipula en las normas ASTM D638 y ASTM D790
- ✓ En el caso de las simulaciones se debe tener mucho cuidado cuando se coloca las sujeciones para las probetas, debido a que esto influye mucho en los resultados finales y podemos obtener valores erróneos y que no sean confiables por lo que es de mucha importancia asesorarse para entender y comprender las características de cada una de las sujeciones existentes en el software.

REFERENCIAS

- [1] A. Del Medico Bravo, «Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida,» Tenerife, 2017.
- [2] J. Roa, «Caracterización de las propiedades mecánicas a tensión del ácido poliláctico PLA procesado por manufactura aditiva FFF considerando la degradación por humedad y temperatura,» Bogotá, Colombia, 2017.
- [3] S. Ponce y V. Guerrero, «Propiedades Mecánicas de Compuestos Biodegradables elaborados a base de Ácido Poliláctico reforzados con fibras de Abacá,» *Revista EPN*, vol. 33, nº 2, 2014.
- [4] P. Arribas, «Procedimiento y Caracterización de probetas de plástico fabricadas mediante la impresión 3D,» Burgos, 2016.
- [5] T. Hou, T. Huang, F. Sun y S. Wang , «Ultimate Tensile Strengthin Fused Deposition Modeling Considering Process Parameters of Flow Rate and Printing Head Speed,» *International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS)*, nº 12, pp. 111-116, 2018.
- [6] T. Nagendra, B. Wittbrodt y J. Pearce, «Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament,» *Additive Manufacturing*, vol. 15, pp. 40-47, 2017.
- [7] Shabana, R. V. Nikhil Santosh, J. Sarojini, K. Arun Vikram y V. V. Lakshmi, «Evaluating the Mechanical Properties of Commonly Used 3d Printed ABS and PLA Polymers with Multi Layered Polymers,» *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 8, nº 6, pp. 2351-2356, 2019.

- [8] K. Heechang, P. Enjun, K. Suhyun, P. Bumsoo, K. Namhun y L. Seungchul, «Experimental Study on Mechanical Properties of Single- and Dual-Material,» *Procedia Manufacturng*, vol. 10, pp. 887-897, 2017.
- [9] X. Rodríguez Campillo, «Proyecto de diseño de piezas modeladas con una impresora 3D para la realización de prácticas de laboratorio de la asignatura de resistencia de materiales y teoría de estructuras,» 2018.
- [10] G. I. Pacheco Carpio, «Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO.,» Cuenca, Ecuador, 2019.
- [11] F. Quevedo Pérez, «Parametrización mecánica de materiales para la impresión 3D,» 2017.
- [12] P. A. Gallego Botero y R. F. Claros Claros, «Diseño mecánico de una máquina universal de ensayos para polímeros,» 2007.
- [13] D. Ramírez Ortega, «Estudio del concentrador de tensiones en materiales de impresión 3D,» 2018.
- [14] G. A. Ruiz Domínguez, R. U. Rivera Landaverde, G. Orrantía, M. d. J. Tellez Moroyoqui y Á. A. Valenzuela Martínez, «Estudio de Esfuerzo y Deformación de Piezas de Impresión 3D,» *Conciencia Tecnológica*, nº 57, pp. 28-33, 2019.
- [15] M. A. Caminero, J. M. Chacón, E. García Plaza, P. J. Núñez, I. García Moreno y G. P. Rodríguez, «Fabricación aditiva de estructuras 3Dreforzadas: efectos de los parámetros de impresión en el comportamiento mecánico,» *Materiales Compuestos*, vol. 3, nº 3, pp. 40-46, 2019.

- [16] M. Pérez Wic, «Diseño de piezas modeladas con una impresora 3D para la realización de prácticas de laboratorio de la asignatura de resistencia de materiales y teoría de estructuras,» 2019.
- [17] J. V. Molina Osejos, «Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos deferentes,» Quito, 2016.
- [18] J. P. Illanes Rumiguano, «Análisis de esfuerzos y resistencias de los principales materiales utilizados para la fabricación de elementos en impresoras 3D y su posible uso del vehículo,» Quito, Ecuador, 2016.
- [19] A. M. Guerrero Castillo, L. V. Campos Arcos y C. A. Rincón López, «Diseño e implementación de una interface de usuario para la instrumentación del péndulo de impacto ZWICK 5102 para la caracterización mecánica de materiales poliméricos,» *Scientia ET Technica*, pp. 182-187, 2015.
- [20] W. Calle Guamantario, «Influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo coste.,» Valencia, 2015.
- [21] F. Alvarez y E. Ruiz, «Tresdp 3D Printing,» 2017. [En línea]. Available: www.tresdp.com.
- [22] L. Gómez Reyes, «Documentary analysis of the advantages of 3D printing,» *Revista Ibeoamericana de las ciencias computacionales e informática*, vol. 6, n° 11, 2017.
- [23] G. Fazzini, P. Paolini, R. Paolucci, D. Chiulli, G. Barile, A. Leoni, M. Muttillio, L. Pantoli y G. Ferri, «Print On Air: FDM 3D Printing Without

Supports,» de *II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)*, 2019.

- [24] S. Romero Fuentes, «Estudio comparativo de los métodos de fabricación aditiva para el titanio y sus aleaciones,» Barcelona, 2017.
- [25] H. J. Mejia Flores, «Ventajas y desventajas de las impresoras 3D,» *Revista Tecnológica*, pp. 30-34, 2016.
- [26] M. Arif, S. Kumar, K. Varadarajan y W. Cantwell, «Performance of biocompatible PEEK processed by fused deposition additive manufacturing,» *Materials and Design*, vol. 146, pp. 249-259, 7 Marzo 2018.
- [27] L. Contreras Howard, «3D natives,» 10 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/impresoras-3d-de-gran-formato-100120192/>.
- [28] D. Torrebalanca Díaz, «Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos,» *ICONOFACTO*, pp. 118-143, 2016.
- [29] J. Dizon, A. Espera, Q. Chen y R. Advíncula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers,» *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018.
- [30] E. D. V-Niño, J. L. Endrino Armenteros, H. A. Estupiñán Duran, B. Pérez Gutiérrez y A. Diaz Lantada, «Caracterización microscópica de texturas superficiales fabricadas aditivamente mediante estereolitografía láser,» *Respuestas*, vol. 21, n° 2, pp. 37-47, 6 Junio 2016.
- [31] Formizable, «formizable!,» 2019. [En línea]. Available: <https://formizable.com/como-funciona-la-estereolitografia/>.
- [32] I. Gil Gil, «La impresión 3D y sus alcances en la arquitectura,» Madrid, España, 2015.

- [33] B. M. Rodríguez, «Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con una tecnología FDM,» Barcelona, España, 2017.
- [34] T. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. Nguyen y D. Hui, «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,» *Composites Part B*, nº 143, pp. 172-196, 6 Febrero 2018.
- [35] B. Molero Hidalgo, «Diseño Generativo con Solid Edge,» 12 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://generativedesignpro.wordpress.com/2018/05/12/procesos-de-fabricacion-aditiva-am/>.
- [36] J. A. Velásquez Acosta, «Procesos de Manufactura con tecnología 3D,» *CTSCafe*, vol. 3, nº 7, Marzo 2019.
- [37] W. Zixiang, W. Jianlei, T. Senthil y W. Lixing, «Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing,» Elsevier Ltd, Beijing, 2016.
- [38] P. A. Heredia López, «Impresora 3D por estereolitografía,» Ibarra, Ecuador, 2018.
- [39] S. Sánchez Restrepo, «3Dnatives,» 10 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>.
- [40] J. Chacón, M. Caminero, E. García Plaza y P. Nuñez, «Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,» *Materials and Design*, vol. 124, pp. 149-157, 28 Marzo 2017.

- [41] M. H. Ali, G. Yerbolat y S. Amangeldi, «Material Optimization Method in 3D Printing,» de *IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (IEEE ICAM 2018)*, Astana, Kazakhstan, 2018.
- [42] F. Leyton, «Estudio y caracterización de las variables que afectan a la impresión 3D en la generación de objetos manipulables,» 2016.
- [43] A. E. Ñauta Ñauta y M. R. Vergara Idrovo, «Simulación de Termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión 3D,» Cuenca, Ecuador, 2017.
- [44] P. A. Quinga Escobar, «Modelado 3D personalizado y creación de prótesis externa del dedo índice izquierdo, para un funcionamiento biomecánico eficiente.,» 2018.
- [45] P. Fidalgo, «El plural,» 2 Abril 2018. [En línea]. Available: https://www.elplural.com/el-telescopio/sostenibilidad/lego-presenta-sus-ladrillos-de-plastico-ecologico_125937102.
- [46] M. Palacios Alamillo, «Diseño y puesta en marcha de nuevos filamentos cargados para su uso en impresión 3D,» 2017.
- [47] S. Sánchez Restrepo, «3D Natives,» 1 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>.
- [48] G. Herráez Arribas, «Desarrollo de un mango adaptado para personas mayores mediante impresión 3D,» Valladolid, España, 2019.
- [49] M. P. Cañas Masapanta, «Prototipo de impresora 3D con arduino para producir prótesis no ortopédicas,» Quito, Ecuador, 2018.
- [50] F. Bordignon, A. A. Iglesias y Á. Hahn, Diseño e impresión de objetos 3D. Una guía de apoyo a escuelas, Buenos Aires,: UNIPE: Editorial Universitaria, 2018, p. 114.

- [51] ASTM D638-14, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,»
ASTM International, West Conshohocken, Pensilvania, 2014.
- [52] Ultimaker, «Ultimaker,» 2011. [En línea]. Available:
<https://ultimaker.com/en/resources/52833-install-ultimaker-cura>.
- [53] S. «ProyectosCAD,» 23 Agosto 2018. [En línea]. Available:
<https://proyectoscad.com/convertir/g-code/que-archivos-puedo-convertir-a-g-code/>.
- [54] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco y C. Pappalettere, «Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory,» *Materials and Design*, vol. 90, pp. 453-458, 2016.

ANEXOS

Anexo 1. Datasheet del filamento PLA



PLA

Technical Data Sheet (TDS)

Physical Properties

Property	Testing Method	Typical Value
Density(g/cm ³ at 21.5°)	ASTM D792 (ISO 1183)	1.24
Glass transition Temperature (°C)	DSC,10°C/min	50-60
Melt index (g/10min)	190°C,2.16kg	5~8
Solubility	/	Insoluble in water; soluble in chloroform, acetone and tetrahydrofuran and so on

Mechanical Properties

Property	Testing Method	Typical Value/ Printing	Typical Value/Injection moulding
Tensile strength(MPa)	ASTM D638 (ISO 527)	44.2±1.3	66.5±0.5
Elongation at break(%)	ASTM D638 (ISO 527)	2.0±0.4	2.2±0.3
Bending modulus(MPa)	ASTM D790 (ISO 178)	3100±220	3295±210
Bending Strength(MPa)	ASTM D790 (ISO 178)	84.1±2.2	98.0±1.2
Impact strength(KJ/m ²)	ASTM D256 (ISO 179)	2.8±0.21 KJ	3.0±0.25

All testing specimens were printed using a 3D printing machine (our machine) under the following conditions: Printing temperature= 210°C, printing speed=80mm/s, number of shells=2, Nozzle size=0.4mm, and 100% infill.

Injection molding processing conditions: Temperature:190°C; Back pressure: 0-1MPa; mould temperature: 30-40°

Thermal Properties

Property	Testing Method	Typical Value
Heat distortion temperature (1.81MPa) / °C	ISO 75	----
Coefficient of linear thermal expansion (K-1.10 ⁻⁵)	ISO 11359	-----

Electrical properties

Property	Testing Method	Typical Value
Surface resistivity /Ω	ASTM D257	---
Comparative tracking index/V	IEC 60112	---

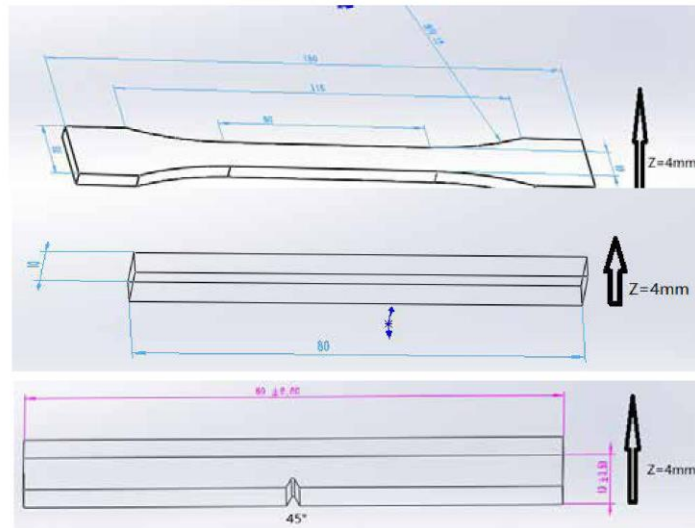
Typical Conditions of Printing

Recommended Printing Temperature	190-230°C
----------------------------------	-----------



Recommended Printing Speed	30-100mm/s
Recommended Heated Bed Temperature	Room temperature-40°C
Layer Height	0.1-0.2mm
Infill	As needed up to 100%
Matters need attention	General print

The Geometries of Mechanical Properties



Disclaimer

This information is based on our experience and we believe it to be reliable, they are intended for reference and comparison purposes only. The values of printing samples may vary significantly with printing conditions. None of this information is to be taken as a license to operate under, or a recommendation to infringe, any patents.



Anexo 2. Datasheet del filamento ABS

Technical data sheet ABS

Ultimaker

Chemical composition	See ABS safety data sheet, section 3
Description	Used by an array of industries worldwide, ABS is known for its exceptional mechanical properties. Ultimaker ABS is specifically formulated to minimize warping and ensure consistent interlayer adhesion
Key features	Excellent mechanical properties and interlayer adhesion (especially when using the front enclosure add-on), superior aesthetics, minimal warping, and reliable bed adhesion
Applications	Visual and functional prototyping, and short-run manufacturing
Non-suitable for	Food contact and <i>in vivo</i> applications. Long term UV exposure can negatively affect properties of an ABS print. Applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 85 °C

Filament specifications

	Value	Method
Diameter	2.85 ± 0.05 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	750 g	-
Filament length	~ 107 m	-

Color information

Color	Color code
ABS Black	RAL 9017
ABS White	RAL 9003
ABS Red	RAL 3020
ABS Blue	RAL 5002
ABS Silver	RAL 9006
ABS Pearl Gold	RAL 1036
ABS Green	RAL 6018
ABS Orange	RAL 2008
ABS Yellow	RAL 1023
ABS Gray	RAL 7011

Mechanical properties*

	Injection molding		3D printing	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	2,030 MPa	ISO 527 (1 mm/min)	1,618.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	43.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)	39 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	33.9 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	4.8%	ISO 527 (50 mm/min)	3.5%	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	34%	ISO 527 (50 mm/min)	4.8%	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	70.5 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	2,070 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23 °C)	-	-	10.5 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23 °C)	58 KJ/m ²	ISO 179	-	-
Hardness	-	-	76 (Shore D)	Durometer

Electrical properties*

	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Dissipation factor (at 1 MHz)	-	-	0.012	ASTM D150-11
Dielectric constant (at 1 MHz)	-	-	2.69	ASTM D150-11

Thermal properties

	Typical value	Test method
Melt mass-flow rate (MFR)	41 g/10 min	ISO 1133 (260 °C, 5 kg)
Heat detection (at 0.455 MPa)	-	-
Heat deflection (at 1.82 MPa)	-	-
Vicat softening temperature	97 °C	ISO 306
Glass transition	-	-
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	225 - 245 °C	ISO 294
Thermal shrinkage	-	-

*See notes

Other properties

	Value	Test method
Specific gravity	1.24	ASTM D1505
Flame classification	-	-

Notes

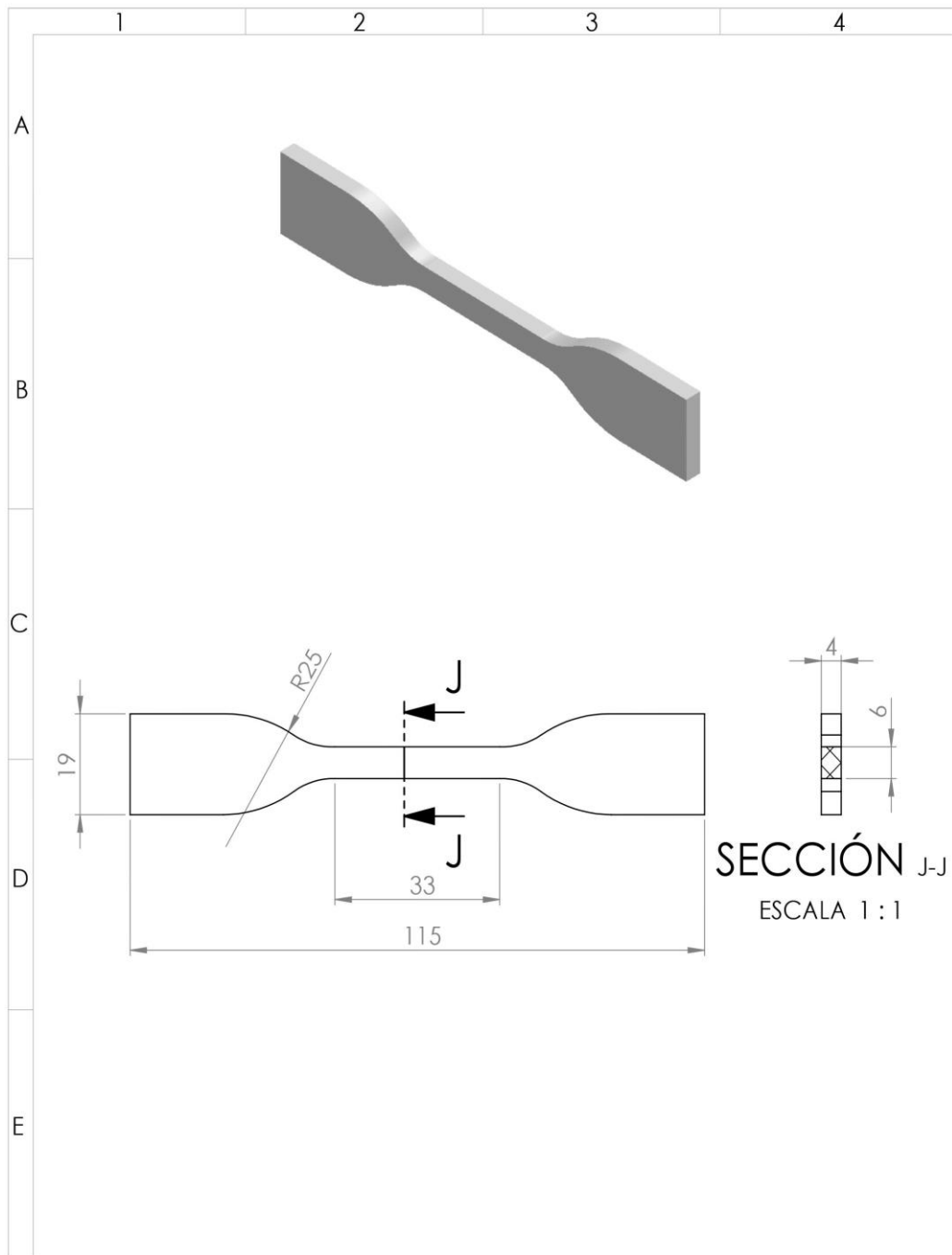
Properties reported here are average of a typical batch. The 3D printed test specimens were printed in the XY plane, using the fine quality profile in Ultimaker Cura 2.1, an Ultimaker 2+, a 0.4 mm nozzle, 90% infill, and 250 °C nozzle temperature. The values are the average of five white and five black specimens for the tensile, flexural, and impact tests. The Shore hardness D was measured in a 7-mm-thick square in the XY plane, using the normal quality profile in Cura 2.5, an Ultimaker 3, a 0.4 mm print core and 100% infill. The electrical properties were measured on a 54-mm-diameter disk with 3 mm thickness printed in the XY plane, using the fine quality profile (0.1 mm layer height) in Ultimaker Cura 3.2.1, an Ultimaker 3, a 0.4 mm print core, and 100% infill. Ultimaker is constantly working on extending the TDS data.

Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Ultimaker nor its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Ultimaker nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Ultimaker's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	Version 4.001
Date	September 3, 2018

Anexo 4. Plano de la probeta de Tracción



SECCIÓN J-J
ESCALA 1 : 1

				Tolerancias	Peso: 6.50 g	Materiales: PLA / ABS	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala
				Dib. 05/12/2019	Cristian Urresta	Prueba de ensayo a Tracción	1:1
				Rev. 28/01/2020	Carlos Villarreal		
				Apro. 30/01/2020	Victor Erazo		
						Número del dibujo:	
						(Sustitución)	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				