
Análisis de resistencia mecánica y térmica para piezas fabricadas en PLA con impresión 3D

Xavier Pimentel Perez



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



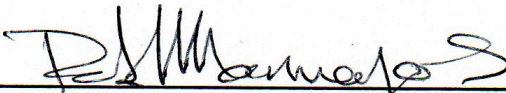
**Análisis de resistencia mecánica y térmica para piezas
fabricadas en PLA con impresión 3D**

Trabajo de graduación presentado por Xavier Pimentel Perez para optar
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

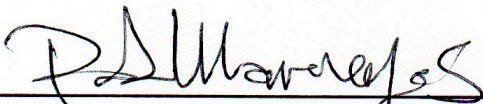
2019

Vo.Bo.:


(f) 

Ing. Pablo Mazariegos


Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Pablo Mazariegos

(f) 

Msc. Carlos Esquit

(f) 

Ing. Kurt Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 17 de Junio de 2019.

La motivación del trabajo nace del querer ayudar a que exista un registro de las características mecánicas del material PLA que es utilizado en los makerspaces que existen en la universidad, sometiendo al material a distintos ensayos y registrando sus propiedades para que queden al alcance de los estudiantes.

Agradezco principalmente a mis padres por su apoyo incondicional durante toda mi vida, por siempre estar cuando los necesito. También agradezco a mis hermanos por el apoyo y cariño que me brindan. Agradezco a mis amigos que me brindaron su apoyo durante la toda la carrera. Por último, agradezco a cada catedrático que ayudó a la realización de este trabajo de investigación.

Prefacio	III
Lista de figuras	VII
Lista de cuadros	IX
Resumen	X
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Justificación	2
3. Objetivos	3
3.1. Objetivo general	3
3.2. Objetivos específicos	3
4. Marco teórico	4
4.1. Impresión 3D	4
4.1.1. Proceso de la impresión 3D	4
4.2. Tecnologías de la impresión 3D	6
4.2.1. Modelado por deposición fundida (FDM)	6
4.2.2. Estereolitografía (SLA)	7
4.2.3. Sinterización selectiva por láser (SLS)	8
4.3. Programa Ultimaker Cura	8
4.3.1. Menú de herramientas de ajuste	9
4.3.2. Configuración de impresión 3D	11
4.4. Ácido poliláctico (PLA)	20
4.5. Ensayos mecánicos	22
4.5.1. Ensayo de tracción	22
4.5.2. Ensayo de compresión	24
4.5.3. Ensayo de flexión	24

4.5.4.	Ensayo de corte	25
4.5.5.	Temperatura de transición vítrea	26
5.	Marco metodológico	27
5.1.	Geometría y muestra de probetas	28
5.2.	Proceso de impresión y parámetros modificados	29
5.3.	Procedimiento para ensayos realizados	32
6.	Resultados	37
6.1.	Resultados de ensayos de tracción	37
6.2.	Resultados de ensayos de compresión	44
6.3.	Resultados de ensayos de corte	53
6.4.	Resultados de ensayos de flexión	54
6.5.	Resultados de temperatura	61
7.	Discusión	62
7.1.	Análisis de datos del ensayo de tracción	62
7.2.	Análisis de datos del ensayo de compresión	63
7.3.	Análisis de datos del ensayo de corte	64
7.4.	Análisis de datos del ensayo de flexión	65
7.5.	Análisis de datos de temperatura	66
8.	Conclusiones	67
9.	Recomendaciones	69
10.	Bibliografía	70
11.	Anexos	72
11.1.	Probetas impresas en 3D	72
11.2.	Probetas luego de los ensayos	74
11.3.	Vídeos de ensayos mecánicos	77

Lista de figuras

1.	Proceso de Impresión 3D [5]	5
2.	Impresión 3D por deposición fundida [11].	7
3.	Impresión 3D por estereolitografía [11].	7
4.	Impresión 3D por sinterización selectiva por láser [11].	8
5.	Interfaz principal de Ultimaker Cura	9
6.	Opción de posicionamiento	10
7.	Opción de escalamiento	11
8.	Opción de rotación	11
9.	Modo recomendado	12
10.	Modo personalizado	13
11.	Menú de calidad	14
12.	Ejemplo de altura de capa [12].	14
13.	Menú de caparazón	15
14.	Menú de relleno	16
15.	Porcentajes de relleno	16
16.	Patrones de relleno	17
17.	Menú de material	17
18.	Menú de velocidad	17
19.	Menú de recorrido	18
20.	Menú de enfriamiento	18
21.	Menú de soporte	19
22.	Menú de capa de adhesión	20
23.	Unidad estructural del polímero PLA (C ₃ H ₄ O ₂) _n [15].	20
24.	Gráfica esfuerzo-deformación.	23
25.	Ensayo de compresión.	24
26.	Ensayo de flexión: tres puntos.	25
27.	Ensayo de corte: configuración inicial.	26
28.	Probeta para ensayo de tracción.	28
29.	Probeta para ensayo de flexión.	28
30.	Probeta para ensayo de compresión.	29
31.	Probeta para ensayo de corte.	29
32.	Orientación de los patrones en probeta de tracción.	31

33.	Orientación de los patrones en probeta de flexión.	31
34.	Orientación de los patrones en probeta de compresión.	32
35.	Orientación de los patrones en probeta de corte.	32
36.	Máquina de ensayos universales.	33
37.	Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de compresión.	34
38.	Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de tracción.	35
41.	Horno de convección y multímetro para prueba térmica.	35
39.	Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de corte.	36
40.	Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de flexión.	36
42.	Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - 30 % infill	39
43.	Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - 60 % infill	40
44.	Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - 99 % infill	42
45.	Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - patrón triangular	43
46.	Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - patrón lineal	43
47.	Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - patrón concéntrico	44
48.	Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - 30 % infill	46
49.	Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - 60 % infill	49
50.	Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - 99 % infill	51
51.	Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - patrón triangular	52
52.	Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - patrón lineal	52
53.	Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - patrón concéntrico	53
54.	Ensayo de corte: diferentes patrones al 30 % infill	53
55.	Ensayo de corte: diferentes patrones al 60 % infill	54
56.	Ensayo de corte: diferentes patrones al 99 % infill	54
57.	Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - 30 % infill	56
58.	Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - 60 % infill	57
59.	Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - 99 % infill	58
60.	Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - patrón triangular	60
61.	Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - patrón lineal	60
62.	Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - patrón concéntrico	61
63.	Temperatura de fusión del PLA	61
64.	Probetas de tracción	72
65.	Probetas de compresión	73
66.	Probetas de corte	73
67.	Probetas de flexión	74
68.	Probetas de tracción ensayadas	74
69.	Probetas de compresión ensayadas	75
70.	Probetas de corte ensayadas	75
71.	Probetas de flexión ensayadas	76
72.	Probetas de prueba térmica	76

Lista de cuadros

1.	Métodos de impresión 3D	6
2.	Temperaturas de impresión del PLA	21
3.	Propiedades mecánicas del PLA	21
4.	Métodos de ensayo para pruebas mecánicas	27
5.	Muestra de probetas	28
6.	Parámetros modificados para probetas de tracción.	29
7.	Parámetros modificados para probetas de flexión.	30
8.	Parámetros modificados para probetas de compresión.	30
9.	Parámetros modificados para probetas de corte.	30
10.	Ensayo de tracción: patrón triangular - 30 % de infill	38
11.	Ensayo de tracción: patrón lineal - 30 % infill	38
12.	Ensayo de tracción: patrón concéntrico - 30 % infill	38
13.	Ensayo de tracción: propiedades mecánicas - 30 % infill	39
14.	Ensayo de tracción: patrón triangular - 60 % infill	39
15.	Ensayo de tracción: patrón lineal - 60 % infill	40
16.	Ensayo de tracción: patrón concéntrico - 60 % infill	40
17.	Ensayo de tracción: propiedades mecánicas - 60 % infill	41
18.	Ensayo de tracción: patrón triangular - 99 % infill	41
19.	Ensayo de tracción: patrón lineal - 99 % infill	41
20.	Ensayo de tracción: patrón concéntrico - 99 % infill	42
21.	Ensayo de tracción: propiedades mecánicas - 99 % infill	42
22.	Ensayo de compresión: patrón triangular - 30 % infill	45
23.	Ensayo de compresión: patrón lineal - 30 % infill	45
24.	Ensayo de compresión: patrón concéntrico - 30 % infill	46
25.	Ensayo de compresión: patrón triangular - 60 % infill	47
26.	Ensayo de compresión: patrón lineal - 60 % infill	47
27.	Ensayo de compresión: patrón concéntrico - 60 % infill	48
28.	Ensayo de compresión: propiedades mecánicas - 30 % infill	48
29.	Ensayo de compresión: propiedades mecánicas - 60 % infill	48
30.	Ensayo de compresión: patrón triangular - 99 % infill	49
31.	Ensayo de compresión: patrón lineal - 99 % infill	50

32.	Ensayo de compresión: patrón concéntrico - 99 % infill	51
33.	Ensayo de compresión: propiedades mecánicas - 99 % infill	52
34.	Ensayo de flexión: patrón triangular - 30 % infill	55
35.	Ensayo de flexión: patrón lineal - 30 % infill	55
36.	Ensayo de flexión: patrón concéntrico - 30 % infill	55
37.	Ensayo de flexión: propiedades mecánicas - 30 % infill	56
38.	Ensayo de flexión: patrón triangular - 60 % infill	56
39.	Ensayo de flexión: patrón lineal - 60 % infill	57
40.	Ensayo de flexión: patrón concéntrico - 60 % infill	57
41.	Ensayo de flexión: propiedades mecánicas - 60 % infill	58
42.	Ensayo de flexión: patrón triangular - 99 % infill	58
43.	Ensayo de flexión: patrón concéntrico - 99 % infill	59
44.	Ensayo de flexión: patrón lineal - 99 % infill	59
45.	Ensayo de flexión: propiedades mecánicas - 99 % infill	59

El enfoque de la investigación fue el de llevar a cabo ensayos mecánicos y una prueba térmica para la caracterización del material ácido poliláctico (PLA) por medio de la realización de probetas de dicho material con impresión 3D mediante la tecnología modelado por deposición fundida variando los parámetros de impresión: patrón de relleno y porcentaje de relleno. Se procedió a seguir las normas ISO 527 para el ensayo de tracción, ISO 178 para el ensayo de flexión, ASTM D695 para el ensayo de compresión y ASTM D732 para el ensayo de corte. Utilizando una máquina de ensayos universal se extrajo datos de forma manual y se analizaron las propiedades mecánicas del PLA luego de realizar los ensayos; se obtuvo que los patrones lineal y concéntrico con un 99% de infill son los más resistentes a la tracción soportando 28.910 MPa, el patrón más resistente a la compresión es el lineal con un 99% de infill soportando 45.649 MPa, el patrón más resistente a esfuerzos de corte es el concéntrico con un 99% de infill soportado 27.576 MPa y los patrones concéntrico con un 60% de infill y triangular con un 99% de infill son los más resistentes a la flexión con un valor de 114.397 MPa. Para la prueba térmica se corroboró la temperatura de fusión del PLA utilizando un horno de convección y midiendo la temperatura con un multímetro, obteniendo una temperatura de fusión media de 156.750°C.

The focus of the research was to perform mechanical tests and a thermal test for the characterization of the polylactic acid (PLA) by making test tubes of this material with 3D printing by fused deposition modeling technology and during the process varying the printing parameters: Fill pattern and fill percentage. The ISO 527 standards for the tensile test, ISO 178 for the bending test, ASTM D695 for the compression test and ASTM D732 for the shear test were followed. Using a universal testing machine, the data was extracted manually and the mechanical properties of the PLA were analyzed after carrying out the tests; it was obtained that the linear and concentric patterns with a 99% of infill are the most resistant to traction supporting 28.910 MPa, the most resistant to compression is the linear pattern with 99% of infill supporting 45.649 MPa, the most resistant to shear stresses is the concentric with a 99% infill supported 27.576 MPa and concentric patterns with a 60% infill and triangular with a 99% infill are the most resistant to bending with a value of 114.397 MPa. For the thermal test, the melting temperature of the PLA was corroborated using a convection oven and measuring the temperature with a multimeter, obtaining an average melting temperature of 156,750 *circ*C.

Actualmente la impresión 3D que utiliza la tecnología de modelado por deposición fundida se ha hecho parte importante en la fabricación de proyectos en la comunidad estudiantil en distintos cursos durante su carrera universitaria, a tal punto que se requiere que los estudiantes aprendan el proceso de impresión 3D para la realización de ciertos proyectos con el fin de familiarizarlos con esta tecnología que brinda ventajas importantes como el prototipado rápido, bajo costo y sencillez del proceso, esto con respecto a un proceso de manufactura convencional.

Durante dicho proceso el usuario tiene a su disposición el poder variar ciertos parámetros mediante software, que afectan a la cantidad de material a utilizar y el tiempo de impresión, principalmente esos son los parámetros en lo que se fijan los que están iniciando en el mundo de la impresión 3D y que solamente buscan la realización de proyectos decorativos o artísticos, debido a la flexibilidad en cuanto a manufactura se refiere la impresión 3D.

Conforme van adquiriendo experiencia se percatan que existen más parámetros que pueden ser modificados que no son del conocimiento de los usuarios pero pueden representar una mejoría en las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D, dichas piezas están destinadas a ser utilizados en proyectos de ingeniería o piezas de recambios para maquinaria.

Estos parámetros son el patrón de relleno y el porcentaje de relleno, para determinar si existirá algún cambio importante al variar estos parámetros se realizan ensayos mecánicos normalizados, y se determinará que efectivamente que al variar estos parámetros existe una mejora en las propiedades mecánicas del material PLA, a continuación se muestra los procedimientos que fueron utilizados para la realización de pruebas mecánicas, las normas a seguir para realizar la caracterización del material PLA. La geometría de las probetas utilizada para la realización de las pruebas mecánicas, cómo se extraen los datos de una máquina de ensayos y se determina qué patrones son mejores para ciertos esfuerzos aplicados y se corroborará la temperatura de fusión del PLA, al realizar estas pruebas se planea ayudar a la comunidad estudiantil para la elaboración de proyectos que involucren el proceso de impresión 3D para piezas fabricadas con PLA.

Actualmente se puede observar el notable crecimiento de makerspaces en Guatemala. El objetivo de estos espacios es poner a disposición de una comunidad el acceso a equipos, herramientas y conocimiento para facilitar el diseño, prototipado y fabricación de proyectos que generalmente no serían posibles sin estos medios [1]. Al contar con estos espacios a disposición de los alumnos junto con el acceso al software de diseño con programas como: Solid Works, Inventor o AutoCAD, o bien el uso de repositorios en Internet de modelos 3D y el acceso a impresoras 3D que utilizan la tecnología de modelado de deposición fundida, FDM por sus siglas en inglés, se obtiene una gran gama de oportunidades para desarrollar proyectos personales, artísticos o de ingeniería,

Ahora bien, si es cierto que existe una gran oportunidad para crear, también existen limitantes para los diferentes diseños en piezas fabricadas en PLA con impresión 3D, entre ellos se pueden presentar complicaciones geométricas al momento de realizar la impresión, como por ejemplo el no considerar el colocar soportes de impresión en partes como voladizos, no considerar esfuerzos mecánicos al que serán expuestas las piezas finalizadas, como esfuerzos de tracción o flexión por lo tanto no considerar los patrones de relleno ni el porcentaje de los mismos, aplicaciones excesivas de fuerza lo que llevan a la fractura de las piezas o trabajar en temperaturas fuera del rango indicado de la temperatura de fusión que hacen que los proyectos fallen. La motivación principal de este trabajo es la de someter probetas fabricadas en PLA con impresión 3D a diferentes ensayos mecánicos y a una prueba térmica para poder analizar las características del material PLA que es utilizado por las impresoras 3D para la fabricación de piezas y así poder ayudar a los miembros de la comunidad estudiantil a tener estos datos a su disposición para poder considerarlos al realizar sus proyectos.

3.1. Objetivo general

Realizar pruebas mecánicas para la caracterización de piezas fabricadas en PLA con impresión 3D.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar probetas normalizadas en PLA con impresión 3D según el ensayo a realizarse con diferentes porcentajes de rellenos y mallados.
- Realizar y analizar ensayo de tracción a probetas normalizadas en PLA con impresión 3D variando parámetros de impresión.
- Realizar y analizar ensayo de flexión a probetas normalizadas en PLA con impresión 3D variando parámetros de impresión.
- Realizar y analizar ensayo de corte a probetas normalizadas en PLA con impresión 3D variando parámetros de impresión.
- Realizar y analizar ensayo de compresión a probetas normalizadas en PLA con impresión 3D variando parámetros de impresión.
- Corroborar la temperatura máxima de transición del PLA utilizado para la impresión 3D.
- Proponer parámetros en el proceso de impresión 3D que mejoren las características mecánicas de las piezas fabricadas en PLA con impresión 3D.

4.1. Impresión 3D

La impresión 3D es la tecnología de fabricación por adición, capa por capa, de objetos sólidos tridimensionales a partir de un modelo digital. Su mecanismo de funcionamiento es muy similar al que se utiliza para imprimir en papel, impresión 2D, encontrándose la diferencia de que, en lugar de imprimir sobre un plano, se crea un objeto con volumen [2]. La impresión 3D difiere de los tradicionales mecanizados, técnicas de procesos sustractivos, que se basan principalmente en la eliminación de material tales como el fresado, torneado, corte y perforación [3].

La introducción de la impresión 3D facilitó de manera notable la reducción de tiempo necesario para obtener una primera versión de un producto, en donde entra el término prototipado rápido y eliminar varias restricciones de los métodos de producción tradicionales, como geometrías complejas [4].

4.1.1. Proceso de la impresión 3D

Independientemente del enfoque que se le dé a la impresión 3D, el proceso para imprimir en 3D es generalmente el mismo en todos los casos, se dará una breve explicación a cada uno de los pasos mostrados en la Figura 1.

Modelo 3D

El primer paso consiste en idear los objetos, construcciones o piezas tradicionales antes de modelarlas. Luego, con la ayuda de un software de diseño asistido por computadora que se le conoce comúnmente como CAD por sus siglas en inglés Computer Aided Design se genera a partir de las líneas de un plano técnico o un boceto, de un modelo o prototipo de

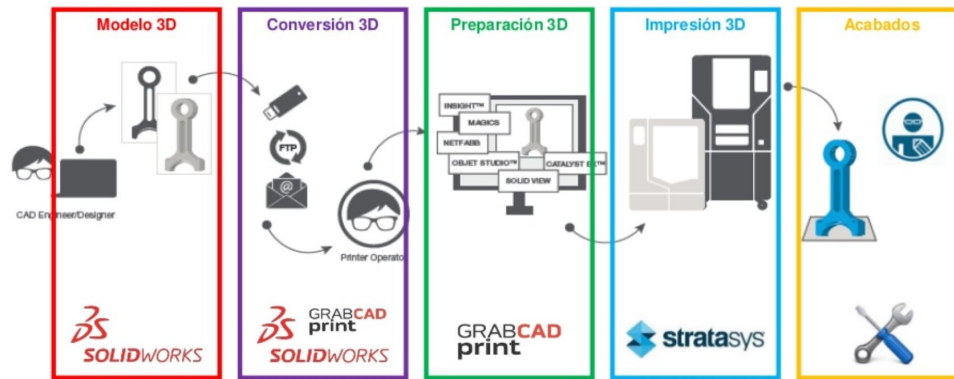


Figura 1: Proceso de Impresión 3D [5]

representación tridimensional [6].

Conversión 3D

Luego de contar con el modelo 3D realizado por la herramienta CAD, se procede a convertir ese modelo 3D a un archivo STL por sus siglas en inglés "Standard Triangle Language" que es un formato creado por 3D Systems en 1987, esto debido a que la mayoría de las impresoras 3D pueden utilizar este tipo de formato [7].

Preparación 3D

Cada modelo 3D que se diseñe para ser impreso debe ser traducido en instrucciones que una impresora 3D pueda entender [7], es en donde entran software como Ultimaker Cura que divide el modelo 3D en capas finas, dentro del software se puede visualizar una vista previa del modelo, ajustar la escala o modificar distintos parámetros de la impresión [8].

Impresión 3D

Cuando se ha configurado correctamente el software que controla la impresora 3D, es momento de dejar que la impresora 3D se encargue de darle forma al modelo 3D, es un proceso casi automático. Dependiendo del tamaño de la pieza, la impresora y el material utilizado, es un proceso que puede durar horas o días. Durante el este proceso el operario debe observar la impresora 3D para asegurarse que no hay errores [7].

Acabados

Aunque la resolución del producto impreso es suficiente para muchas aplicaciones, una mayor resolución se puede lograr mediante el sobre dimensionamiento de la versión original

y luego retirar material con un proceso sustractivo. También se puede mejorar los acabado con la ayuda de soportes durante la construcción del modelo [3].

4.2. Tecnologías de la impresión 3D

Existe una gran variedad de tecnologías en la impresión 3D para la creación de objetos en base de diseños digitales. Las principales diferencias entre estos procesos son la forma en la que las capas son depositadas para la creación de objetos y en los materiales que son utilizados en dichos procesos. Algunos métodos funden o ablandan el material para crear las capas, mientras que otros curan materiales líquidos utilizando tecnologías sofisticadas [9]. En el cuadro 1 se puede observar un resumen de los tipos y tecnologías actuales, así como los materiales que se utilizan actualmente.

Tipo	Tecnologías	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (PLA,ABS), materiales eutécticos, materiales comestibles.
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación de metales.
	Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación de metales.
Granulado	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio.
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico.
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos y polvos cerámicos.
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel aluminio, capa de plástico.
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles.
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles

Cuadro 1: Métodos de impresión 3D

En la actualidad, los tres métodos más comunes de fabricación aditiva son lo que se describirán a continuación.

4.2.1. Modelado por deposición fundida (FDM)

La tecnología FDM, por sus siglas en inglés, fue desarrollada por Stratasys a finales de 1980, que se utiliza principalmente en la creación rápida de prototipos tradicionales a pequeña escala, además de ser el método de impresión 3D más común en impresoras 3D de escritorio. El filamento termoplástico se calienta y se extruye en coordenadas X e Y a través del cabezal de extrusión, mientras que la superficie de impresión va bajando el objeto capa por capa en la dirección Z [10]. La Figura 2 es un ejemplo de cómo se observa la impresión FDM.

Debido la sencillez y estabilidad del proceso se han desarrollado cientos de materiales que pueden ser utilizados en el proceso, los más populares son el ABS y PLA [11].

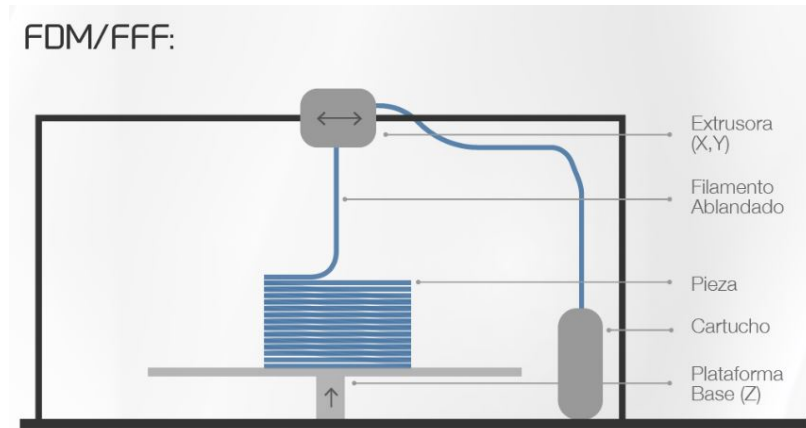


Figura 2: Impresión 3D por deposición fundida [11].

4.2.2. Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía fue inventada por Chuck Hull en 1983, se caracteriza por ser la tecnología de impresión 3D más antigua [10]. Además, es una de las alternativas de mayor precisión y mejor acabado en el mercado.

Una plataforma que se mueve en el eje vertical se encuentra sumergida en una tina de resina fotosensible y un haz de láser se mueve sobre ella en el plano horizontal. Mediante software se dirige el láser mientras hace contacto con la superficie de resina que se endurece y crea una capa; la plataforma en el interior de la tina se mueve hacia abajo dejando el espacio para la siguiente capa y así repetitivamente hasta que la pieza es completada. La Figura 3 muestra un ejemplo de cómo se observa la impresión por estereolitografía.

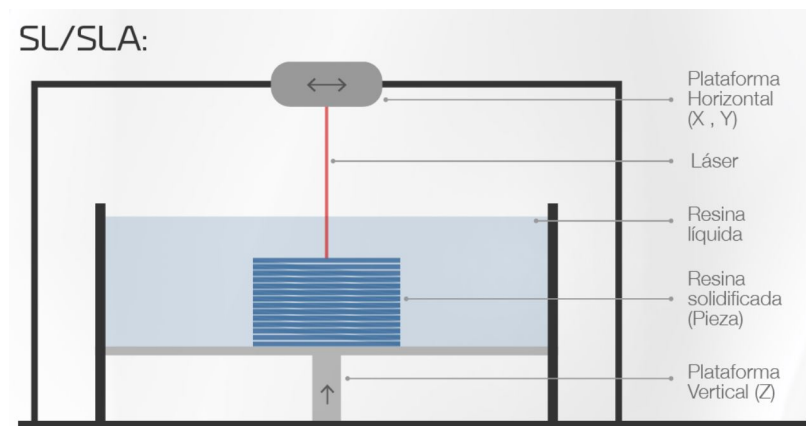


Figura 3: Impresión 3D por estereolitografía [11].

4.2.3. Sinterización selectiva por láser (SLS)

La sinterización selectiva por láser se refiere a un proceso que trabaja con materiales en forma de polvo o arenilla. Un haz de láser es dirigido en un plano horizontal sobre una cama de material compactado que va reaccionando al entrar en contacto con el láser lo que resulta en la sinterización del material, esto permite la creación de objetos sólidos en distintos materiales sin tener que alcanzar las altas temperaturas de fusión que requieren otros procesos [11]. La configuración del proceso se puede observar en la Figura 4.

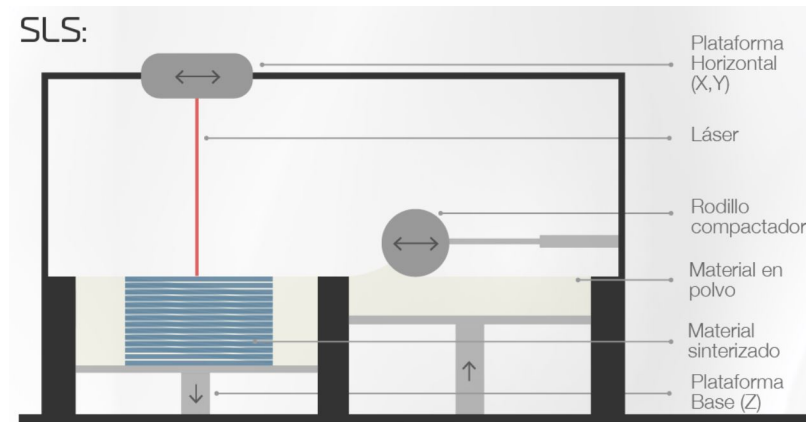


Figura 4: Impresión 3D por sinterización selectiva por láser [11].

4.3. Programa Ultimaker Cura

Como se mencionó anteriormente en el proceso de la impresión 3D hay un paso crucial que es la preparación del modelo 3D para que pueda proceder a imprimirse, para este paso se utilizó del programa Ultimaker Cura en su versión 3.6.0, el cual brinda un espacio al usuario para visualizar su diseño antes de iniciar la impresión, en el mismo se pueden modificar parámetros de ajuste al modelo como la posición, rotación o escala del mismo, al iniciar el programa carga su interfaz principal como se puede observar en la Figura 5, la cual está conformada por los siguiente elementos:

1. Cargar un archivo nuevo, en formato .stl.
2. Menú de herramientas de ajustes para los objetos.
3. Espacio de trabajo de medidas 215mm x 215mm x 200mm, equivalente al espacio de trabajo que brindan las impresoras Ultimaker 3.
4. Opciones de vistas para el objeto sobre espacio de trabajo.
5. Menú de selección de modelo de impresora, configuración del material y cabezal utilizado.
6. Configuración de parámetros para la impresión, modo recomendado.

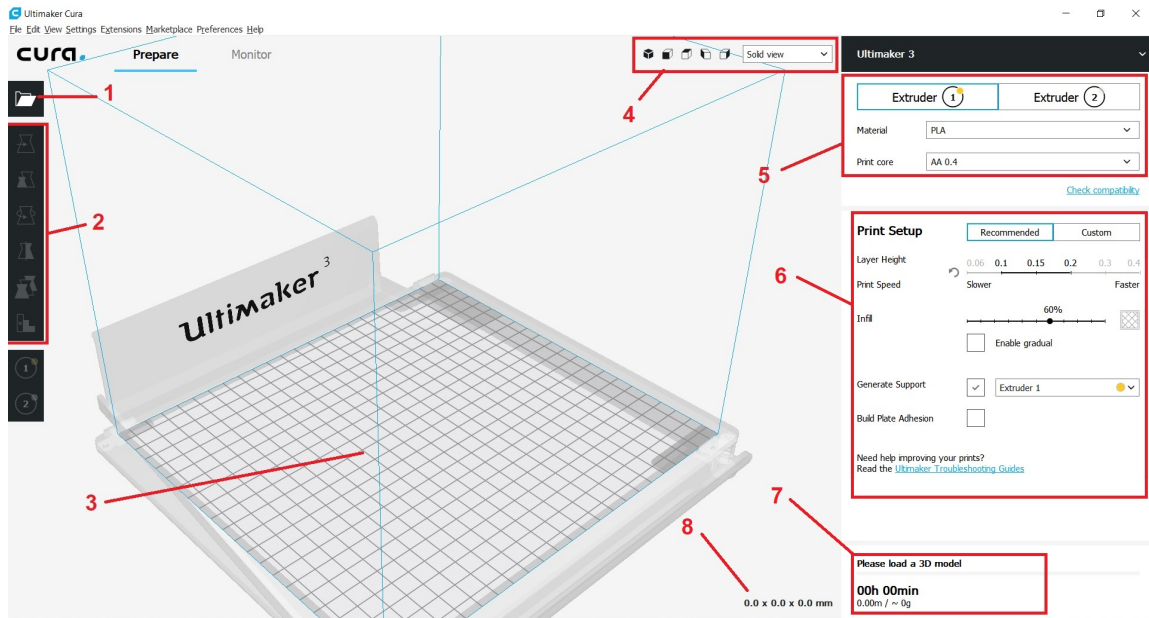


Figura 5: Interfaz principal de Ultimaker Cura

7. Visualización del tiempo de duración de la impresión, cantidad de material a utilizar y peso del objeto.
8. Dimensiones del objeto y nombre del objeto.

4.3.1. Menú de herramientas de ajuste

El software Ultimaker Cura ofrece diferentes herramientas de ajuste antes del proceso de impresión, permitiendo que el usuario pueda posicionar, escalar y rotar fácilmente los objetos para poder utilizar de forma óptima el espacio de trabajo de la impresora 3D.

Posicionamiento

La opción de posicionamiento permite mover el objeto dentro del espacio de trabajo en los ejes X, Y y Z. Los modelos son colocados automáticamente por el software en el origen de dichas coordenadas, esto puede ser modificado por el usuario dentro del software. En la siguiente Figura 6 se puede observar como se vería un objeto siendo movido por la opción de posicionamiento:

1. Ícono de opción de posicionamiento.
2. Interfaz para ingresar las coordenadas específicas para la posición del objeto.
3. Marco de referencia de los ejes X (rojo), Y (verde) y Z (azul).

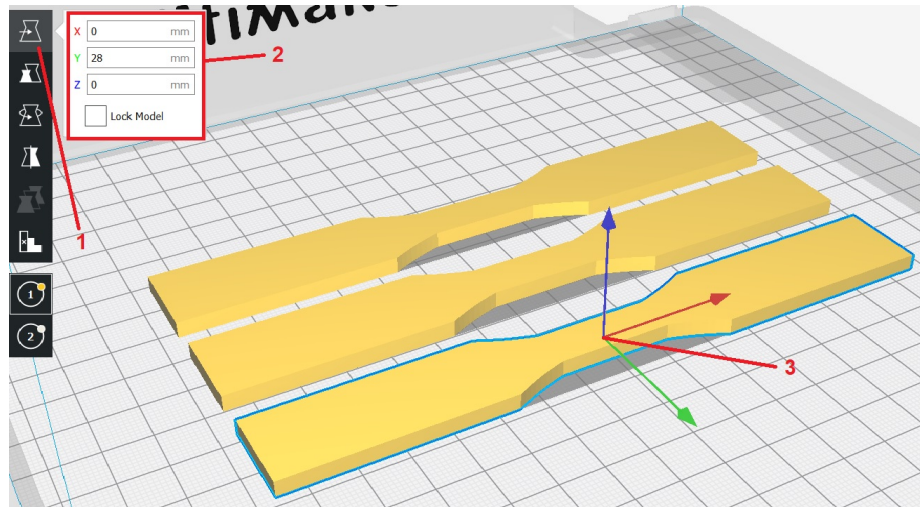


Figura 6: Opción de posicionamiento

Escalamiento

Esta opción permite al usuario poder escalar su objeto dentro del espacio de trabajo, el objeto puede ser escalado de forma uniforme o no uniforme a lo largo de las tres dimensiones en dos formas distintas, ya sea por milímetros o por porcentajes, al utilizar la herramienta puede ser observada como en la Figura 7:

1. Ícono de opción de escalamiento.
2. Interfaz para ingresar la escala de dos formas: medida en milímetros o porcentajes, también tiene la opción de hacerlo de forma uniforme o no uniforme.
3. Marco de referencia de las tres dimensiones hacia donde puede ser escalado el objeto dentro del espacio de trabajo.

Rotación

La herramienta de rotación permite al usuario poder girar objetos alrededor de los tres ejes, esta herramienta es utilizada particularmente para reducir la cantidad de material de soporte que puedan necesitar los modelos, además también es utilizada para encontrar una posición que mejore la adherencia del objeto a la cama de impresión, la medida de rotación es en grados y se puede observar la herramienta es utilizada en la Figura 8:

1. Ícono de opción de rotación.
2. Interfaz para regresar el objeto a su orientación original y opción para dejar que el programa encuentre la posición con mejor adherencia dependiendo de la geometría del objeto.
3. Marco de referencia de las tres dimensiones hacia donde puede rotar el objeto.

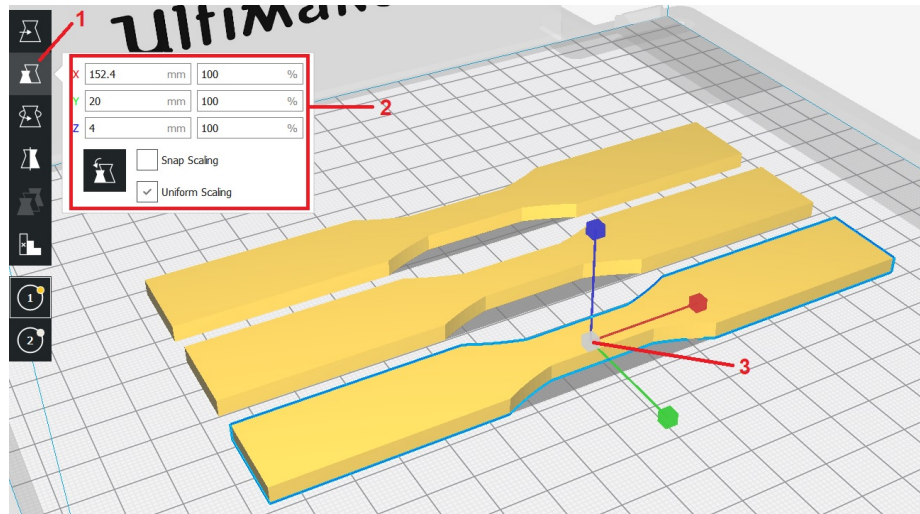


Figura 7: Opción de escalamiento

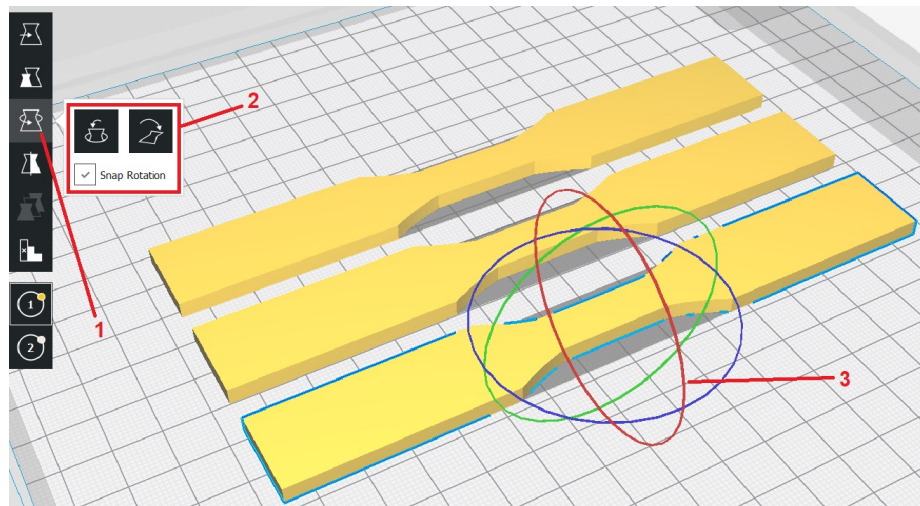


Figura 8: Opción de rotación

4.3.2. Configuración de impresión 3D

En el software hay disponibles dos modos de configuración para la impresión: modo recomendado y modo personalizado, siendo el primer modo para usuarios principiantes y el otro modo para usuarios más experimentados. Ambos modos con el mismo fin que es modificar los parámetros de la impresión los cuales afectarán directamente al tiempo de impresión, las propiedades mecánicas del objeto impreso, cantidad de material a utilizar, entre otros parámetros.

Modo recomendado

Al iniciar el programa se selecciona, por defecto, el modo recomendado. Este modo es el mejor si el usuario requiere hacer impresiones rápidas y con parámetros optimizados,

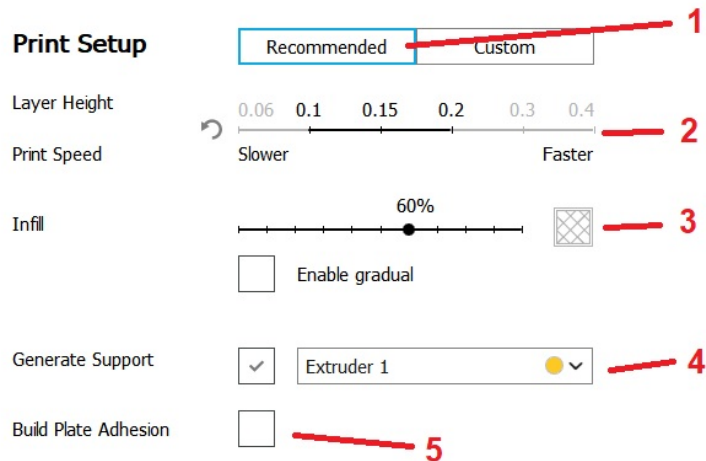


Figura 9: Modo recomendado

teniendo una serie de parámetros que se pueden modificar como se presenta en la Figura 9, se dará una breve explicación de cada parámetro utilizado en este modo:

1. Selector de modos: recomendado o personalizado.
2. Selector de altura de capa, la cual está directamente ligada al tiempo de impresión, a menor altura de capa será más tardada la impresión y a mayor altura de capa será más rápida la impresión.
3. Selector de relleno, varía por porcentaje, esto varía la cantidad de material que tendrá el objeto internamente, además tiene una opción que disminuye la cantidad de material a medida que aumenta la densidad del objeto.
4. Generador de soporte, automáticamente el programa propone un soporte a la pieza si está activa la opción, ayuda a la impresión de piezas que tengan algún tipo de voladizo o sean huecos, evitando fallos en la impresión final.
5. Opción de agregar una capa de adhesión, esto con el fin de evitar que el objeto tenga algún desplazamiento durante la impresión, evitando fallos en la impresión final.

Modo personalizado

Este modo permite al usuario tener control de casi todos los parámetros dentro de la impresión 3D, y los ajusta a las necesidades que se requieran, dentro de este modo existen configuraciones específicas para cada opción como se puede observar en la Figura 10, el listado de dichas configuraciones se explicarán más adelante, el menú principal del modo personalizado es el siguiente:

1. Selector de modos: recomendado o personalizado.

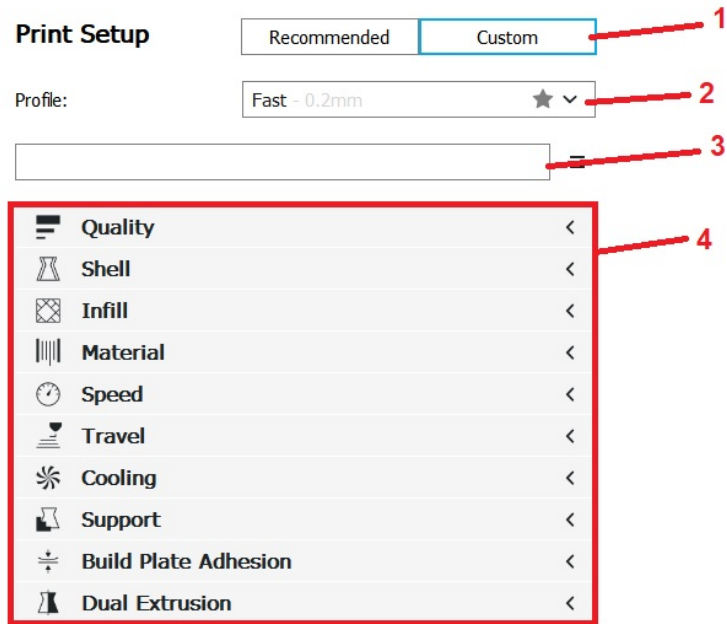


Figura 10: Modo personalizado

2. Selector de perfil, en esta opción se puede observar la primer diferencia entre modos, el cual afecta directamente en la calidad de la impresión final. El seleccionar un perfil afectará tener un acabado extra fino o más rápido, el cual depende de la altura de las capas, velocidad de impresión y varias opciones más, el programa basado en el grosor del filamento, el modelo de la impresora, el cabezal y el material calculará el perfil que mejor se adapte a la impresora para obtener mejores resultados.
3. Barra de búsqueda dentro de las configuraciones.
4. Listado de configuraciones disponibles para la impresión.

A continuación, se desglosará la lista de configuraciones, así como los parámetros que pueden ser modificados dentro de cada configuración y de qué modo afectará el resultado final de la impresión:

Calidad

Cuando se habla de calidad en la impresión 3D está directamente relacionada con la altura de las capas, y así es como se muestra en el menú cuando se selecciona la pestaña de calidad, como se puede observar en la Figura 11. La altura de capa es uno de los parámetros que más se modifican, el grosor de la capa está dada en milímetros. Con una capa más delgada puede mejorar la calidad la impresión, dejando una superficie más suave y con mejor detalles como se muestra en la Figura 12, con la desventaja que se incrementa considerablemente el tiempo de impresión.

1. Ícono indicador que el valor está sincronizado para ambos extrusores de la impresora,



Figura 11: Menú de calidad

solamente es desplegado en impresoras con extrusores duales.

2. Se ingresa la altura de capas en milímetros.

En el modo recomendado permite al usuario seleccionar fácilmente la altura de capa compatible con el cabezal actual en la impresora y configuración del material utilizado, mientras que este modo deja que el usuario colocar la altura a su discreción.

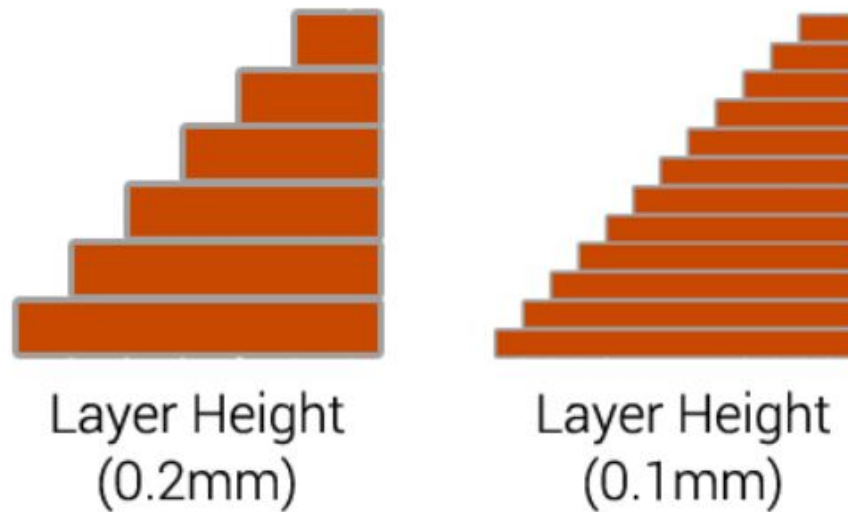


Figura 12: Ejemplo de altura de capa [12].

Caparazón

Esta opción permite al usuario personalizar el caparazón que recubrirá el objeto, en este menú, Figura 13, tiene todos los parámetros que se pueden modificar como:

1. Espesor de pared (mm): esta opción modifica el espesor de las paredes del objeto, en general una pared es dos o tres veces el valor del ancho de la línea utilizada, esto es calculado por Cura. Un valor mayor número de líneas en la pared hará un objeto más



Figura 13: Menú de caparazón

robusto, mientras uno con menor número de líneas puede reducir considerablemente el tiempo y el costo de la impresión.

2. Cantidad de líneas de pared, está relacionado directamente con el espesor de pared, al modificar manualmente este parámetro Cura calcula el espesor de pared automáticamente.
3. Espesor capa inferior y capa superior (mm): el usuario puede especificar el espesor de las capas superior e inferior, un valor mayor asegura que todos los posibles agujeros estén completamente cerrados, viéndose afectados tanto el tiempo como la cantidad de material a utilizar.
4. Espesor de capa superior (mm): se da la opción de tener independencia en cuanto al espesor de la capa superior.
5. Cantidad de capas superiores: número de capas que tendrá la parte superior del objeto, esto tiene que ser múltiplo de la altura de capa.
6. Espesor de capa inferior (mm): se da la opción de tener independencia en cuanto al espesor de la capa inferior.
7. Cantidad de capas inferiores: número de capas que tendrá la parte inferior del objeto, esto tiene que ser múltiplo de la altura de capa.
8. Expansión horizontal (mm): Cantidad de desfase que se le hace a cada capa, este parámetro es importante si se tiene que considerar la tolerancia en los objetos impresos, por ejemplo en agujeros.

Relleno

La densidad del relleno define la cantidad de plástico dentro del objeto que se requiere imprimir. Una mayor densidad de relleno significa una mayor cantidad de plástico utilizado

dentro del objeto, dejando al objeto más resistente, utilizar una densidad de relleno de valor bajo es perfecto para objetos que tienen como objetivo solamente estético, el menú al desplegarse se muestra en la Figura 14



Figura 14: Menú de relleno

1. Densidad del relleno(%): representa la cantidad de relleno que tendrá el objeto a imprimirse. Un ejemplo se puede observar en la Figura 15.
2. Patrón del relleno, dentro del software existen patrones los cuales determinan la forma dentro del objeto, como se puede observar en la Figura 16.

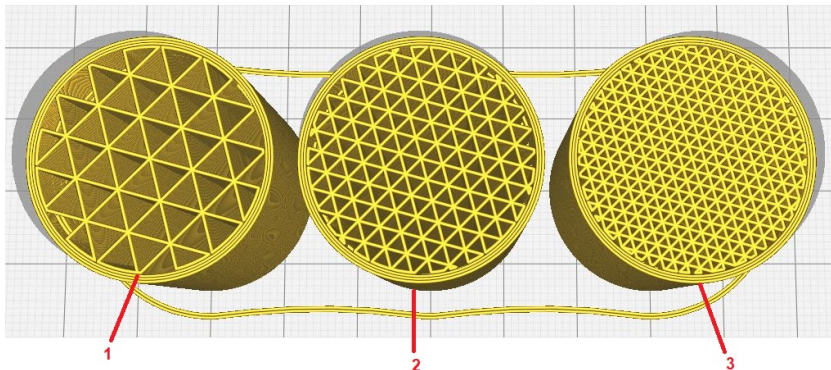


Figura 15: Porcentajes de relleno

1. Densidad de relleno al 30 %, 2. Densidad de relleno al 60 %, 3. Densidad de relleno al 99 %.

Material

En esta opción se permite cambiar la temperatura del extrusor, la temperatura de la cama de impresión y la opción de habilitar o deshabilitar la retracción del material extruido, el menú tiene las siguientes opciones como se muestra en la Figura 17.

1. Temperatura de impresión (°C): la temperatura que llegará el extrusor mientras imprime, cada perfil tiene distintas temperaturas para poder obtener mejores resultados en la impresión, así también cada material utilizado requiere diferentes temperaturas.

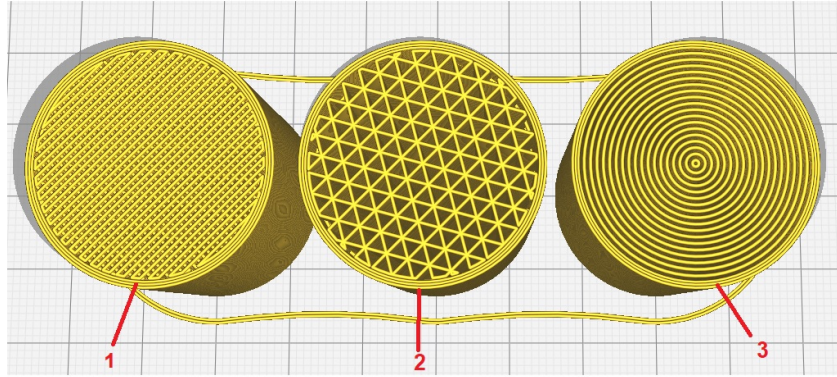


Figura 16: Patrones de relleno
Diferentes patrones de relleno: 1. lineal, 2. triangular, 3. concéntrico.



Figura 17: Menú de material

2. Temperatura de la cama de impresión (°C): Esta opción permite definir la temperatura de la cama mientras se lleva a cabo la impresión, cada material requiere diferentes temperaturas de cama para mejorar la adherencia de las piezas impresas y evitar fallos durante la impresión
3. Retracción: Esta opción es utilizada cuando la impresora necesita hacer el movimiento entre dos objetos en la misma impresión, sin esta opción quedará material entre las piezas y se crearán hilos de material, mientras que si esta opción está activada se reducen los hilos de material entre los objetos, así obteniendo un resultado final más limpio.

Velocidad

El menú que despliega esta opción es como la Figura 18.



Figura 18: Menú de velocidad

1. Velocidad de impresión (mm/s): define la velocidad a la que se moverá el cabezal durante la impresión, con este parámetro Cura calcula el flujo de material en la extrusión, una mayor velocidad hará que el tiempo de impresión disminuya, considerando que tendrá que aumentar la temperatura de impresión, considerar el material utilizado debido al cambio de temperatura.

Recorrido

El menú que despliega esta opción es como la Figura 19.



Figura 19: Menú de recorrido

1. Salto en Z cuando se retrae: con esta opción activada, la mesa de impresión se moverá hacia abajo hasta el valor establecido como referencia cuando se lleve a cabo la retracción, esto permite que el cabezal mientras se desplaza evite el contacto con los objetos en proceso de impresión evitando que el extrusor deje residuos o rasguños que afecten el aspecto del objeto impreso.

Enfriamiento

Esta opción permite al usuario hacer uso de enfriamiento mediante ventiladores en los cabezales, además de poder modificar la velocidad de los mismos, esto con el fin de mejorar la impresión. El menú desplegado de esta opción es como la Figura 20.



Figura 20: Menú de enfriamiento

1. Activar enfriamiento: con esta opción se le permite al usuario activar o desactivar los ventiladores que están en el cabezal, el tener activada esta opción se asegura que el material se ha enfriado correctamente antes de imprimir la siguiente capa, es útil cuando se tiene voladizos o puentes en los objetos, su calidad mejorará.
2. Velocidad del ventilador (%): esto permite al usuario modular la velocidad de los ventiladores, a mayor velocidad mejora el enfriamiento y reduce las fugas, pero incrementa la retracción del material, es por esto que cada material tiene velocidades específicas que evita errores en la impresión. En la sección de perfiles Cura automáticamente calcula las velocidades según el material utilizado.

Soporte

El soporte se utiliza cuando los objetos tienen partes sobresalidas, como voladizos, y al intentar imprimir estas partes se imprimirán en el aire sin ninguna clase de soporte, por lo que Cura propone una estructura que ejercerá de soporte debajo de esas partes sobresalidas para evitar que el plástico caiga, para la generación de soporte se utiliza el menú de la figura 21.



Figura 21: Menú de soporte

1. Generar soporte: al activar esta opción Cura propone el soporte que mejor se adapte al objeto, sin embargo, el usuario puede modificar el soporte a las necesidades de la impresión.
2. Extrusor de soporte: las impresoras con dos extrusores tienen la opción de colocar un extrusor únicamente para colocar material de soporte, por lo que esta opción hace esa función, se selecciona el extrusor que se requiera que haga el soporte, este extrusor puede contener material soluble en agua para facilitar la extracción del soporte.
3. Colocación del soporte: esta opción define en dónde se colocará el material de soporte, contiene las siguientes opciones: tocando la cama de impresión, que imprimirá el material de soporte desde la cama hacia arriba y la opción en todos lados, esta opción imprimirá material de soporte debajo de cada parte que necesite el material, incluso colocará material encima o adentro del objeto, según se requiera.
4. Soporte para el ángulo del voladizo ($^{\circ}$): el ángulo del voladizo influye en la cantidad de material agregado, un ángulo pequeño requerirá mayor cantidad de soporte.

Capa de adhesión

Esta opción permite al usuario generar una capa que ayude a la adherencia del objeto a la cama de impresión, también da la opción de generar líneas de material que sirven para limpiar posible material excedente en el extrusor de impresiones pasadas, el menú es como el de la Figura 22.

1. Habilitar gota de material: esta opción es única para la impresora de doble extrusor, lo que permite es generar una gota de material con el fin de preparar el extrusor para la impresión.

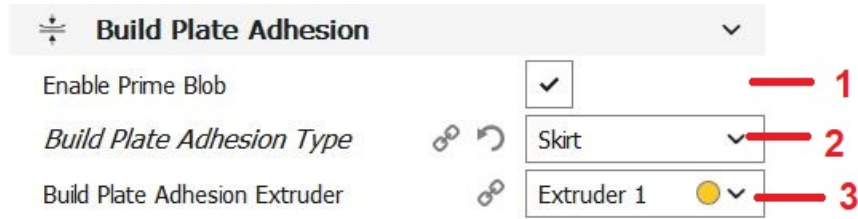


Figura 22: Menú de capa de adhesión

2. Construir tipo de capa de adhesión: el programa permite crear capas de adhesión a la cama de impresión, existen de borde y falda, con el fin de evitar enredos con el material excedente en extrusor o crear mayor área de soporte para los objetos y evitar que se muevan durante la impresión.
3. Extrusor para capa de adhesión: se selecciona qué extrusor se utilizará para la creación de la capa de adhesión.

4.4. Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico, PLA por sus siglas en inglés, es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico, podemos observar su estructura química en la Figura 23, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET). Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, este biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un rango amplio de propiedades [13].

El PLA es el primer polímero sintético biodegradable obtenido a partir de recursos naturales renovables, regularmente se hace a partir de productos como el maíz, remolacha, trigo y productos con alto contenido de almidón. En la actualidad tiene un amplio uso en la industria alimenticia, química y farmacéutica, entre otras [13]. Destaca de manera importante en el mundo de la impresión 3D siendo el material más utilizado en la impresión por deposición fundida y la razón es porque tiene una gran variedad de colores y estilos, lo que lo hace ideal para un gran variedad de aplicaciones [14].

El PLA ha ganado terreno a los otros filamentos como al acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) debido que no necesita una cama caliente para ganar adherencia y el no presentar fuerte olor al ser fundido. En el Cuadro 2 podemos observar las temperaturas que son utilizadas para la impresión del PLA. Gracias a sus bajas temperaturas de transición vítrea

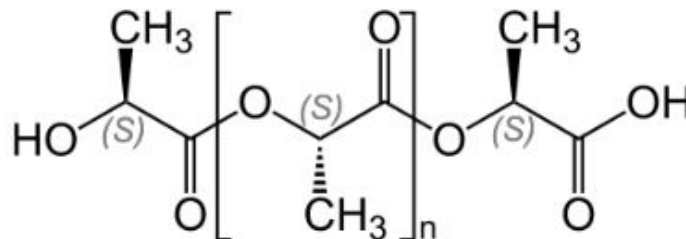


Figura 23: Unidad estructural del polímero PLA $(C_3H_4O_2)_n$ [15].

Temperatura	°C
Temperatura de la cama caliente	20-60 (opcional)
Temperatura de transición vítrea	57
Temperatura de fusión	150-160
Temperatura de impresión	180-230

Cuadro 2: Temperaturas de impresión del PLA

y de fusión, no se requiere aplicar grandes cantidades de calor para lograr imprimir con el PLA.

Una de las dificultades que se pueden llegar a presentar con el filamento PLA es que en ocasiones puede obstruir el cabezal de la impresora 3D, esto ocurre principalmente debido a que se expande y se vuelve pegajoso cuando se está fundiendo [16], para evitar este problema es necesario seguir correctamente las especificaciones del fabricante del filamento adquirido.

En cuanto a propiedades mecánicas el PLA es inferior a la mayoría de filamentos utilizados para la impresión 3D por deposición fundida, ya que tiende a deformarse con facilidad, y eventualmente romperse. En lo que destaca en cuanto a propiedades mecánicas el PLA es tener una dureza superficial elevada, podemos observar algunas propiedades del material en el Cuadro 3.

Propiedades mecánicas	valor típico	método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	2,346.5 MPa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la deformación	49.5 MPa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la rotura	45.6 MPa	ISO 527
Alargamiento a la deformación	3.3 %	ISO 527
Alargamiento a la rotura	5.2 %	ISO 527
Resistencia a la flexión	103.0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	3,150.0 MPa	ISO 178
Resistencia a impacto, prueba Izod	5.1 kJ/m ²	ISO 180
Dureza	83 (Shore D)	Durómetro

Cuadro 3: Propiedades mecánicas del PLA

Los valores mostrados en el Cuadro 3 son brindados por Ultimaker que fue proveedor del filamento que se utilizó para la realización de la investigación.

En la ficha técnica se dejó claro que son valores que corresponden a una serie de pruebas y una serie de parámetros específicos modificados, por lo que están sujetos a cambios. Ahora que se tiene una idea de las propiedades del PLA sabemos que es escogido por la mayoría de gente no por ser el mejor filamento, sino por su versatilidad, además de ser amigable con el ambiente, es recomendable utilizarlo en piezas para prototipado rápido, contenedores, maquetas y evitar el uso en artículos que estén expuestos a altos desgastes y altas temperaturas.

4.5. Ensayos mecánicos

Los ensayos en materiales estudian el comportamiento de los materiales sometidos a diferentes tipos de esfuerzos. En especial, se analiza la relación entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones resultantes, así como los esfuerzos límite que pueden provocar un fallo de funcionamiento en componentes. Las características obtenidas a partir de los métodos de ensayo se emplean para desarrollar materiales y diseñar componentes. Para caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales de la manera más precisa posible, se emplean métodos de ensayos normalizados[17].

4.5.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. La respuesta de un material ante la deformación está influenciada por la relación entre la fuerza aplicada y el tamaño del objeto. Por lo tanto, no se analiza la fuerza sino la razón entre la misma y el área que debe soportarla. A este término se le conoce como esfuerzo [18].

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

En donde, F es la fuerza aplicada axialmente al objeto dada en newton (N) y A es el área de sección transversal en donde se aplica la fuerza dada en metros cuadrados (m^2). Esta razón en el sistema internacional está definida con la unidad N/m^2 o Pascal. El esfuerzo es representado por la letra griega sigma (σ).

La deformación que sufre el material debe ser considerada en relación con la longitud total del objeto, y se denomina como deformación unitaria, al dividir la deformación total entre la longitud del objeto.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Donde, ΔL representa la resta entre la longitud inicial y longitud final del objeto, L la longitud original del objeto, y ϵ representa la deformación verdadera del objeto, en algunos casos se habla de elongación como el tanto por ciento de deformación y se obtiene al multiplicar por 100 la deformación unitaria.

Con estas premisas, el ensayo puede proveer de varios datos con la que se construye una gráfica esfuerzo-deformación como se puede observar en la Figura 24. Un material presenta varias zonas en cuanto a su comportamiento ante un esfuerzo de tracción:

Zona elástica (OB)

Se caracteriza por que al retirar las fuerzas aplicadas a la probeta, esta regresa a su longitud inicial. En buena parte de la curva se mantiene proporcional y a la pendiente de la

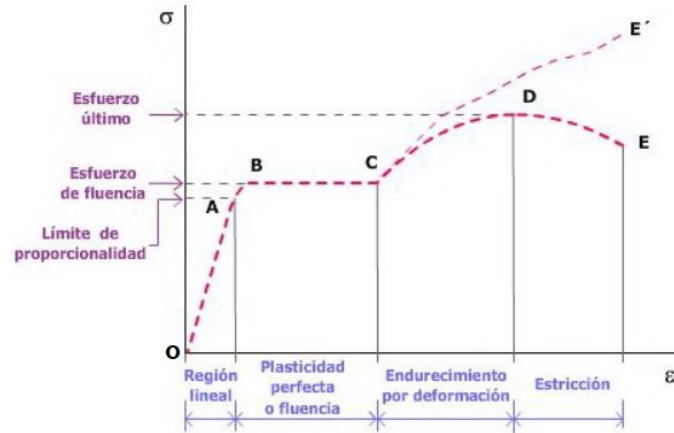


Figura 24: Gráfica esfuerzo-deformación.

esta sección de curva se le denomina módulo elástico o módulo de Young, y la recta responde a una ecuación llamada ley de Hooke:

$$\sigma = E * \epsilon \quad (3)$$

Zona plástica (BE)

En esta zona el material ha pasado su tensión de límite elástico, y el material no regresará a su forma original incluso si se deja de aplicar fuerzas de tensión, el objeto presenta deformaciones permanentes.

Zona de proporcionalidad (OA)

Esta sección se representa por ser una línea recta, es decir, el alargamiento unitario (ϵ) es proporcional a la tensión ejercida (σ). En aplicaciones industriales se maneja en esta zona, ya que no se producen deformaciones permanentes en el material y se puede emplear la ley de Hooke.

Zona de no proporcionalidad (AB)

El material se comporta de forma elástica, pero no existe una relación proporcional entre tensión y deformación

Zona de deformación plástica uniforme (CD)

Se representan grandes alargamientos con un pequeño incremento de tensión. En el punto D se encuentra el límite de rotura y la tensión en ese punto se llama tensión de rotura. A partir de este punto, la probeta se considera rota, aunque físicamente no sea apreciable.

Zona de rotura (DE)

Las deformaciones se pueden apreciar y, aunque disminuya la tensión, el material se deforma hasta la rotura. En el punto D, la probeta se ha fracturado. Cabe mencionar que dicha gráfica esfuerzo-deformación varía de un material a otro, incluso presentando curvas distintas aunque en esencia representan lo mismo.

4.5.2. Ensayo de compresión

El ensayo de compresión es complementario al de tracción. A través del mismo es posible establecer la resistencia mecánica del material, que se mide a través de la cedencia en metales y polímeros. Este ensayo consiste en la aplicación de una fuerza compresiva creciente a velocidad moderada como se observa en la Figura 25 , con lo que se registra el acortamiento o la deformación experimentados por el material hasta la fractura, en materiales frágiles o hasta obtener un determinado grado de deformación plástica del material, en materiales maleables [17]. El cálculo del límite de resistencia por compresión es similar al de tracción, se obtiene:

$$\sigma_c = \frac{F}{S_o} \quad (4)$$

En donde, F es la fuerza hasta la rotura por compresión del material en newtons (N), S_o es el área de la sección transversal de la probeta en metros cuadrados (m^2).

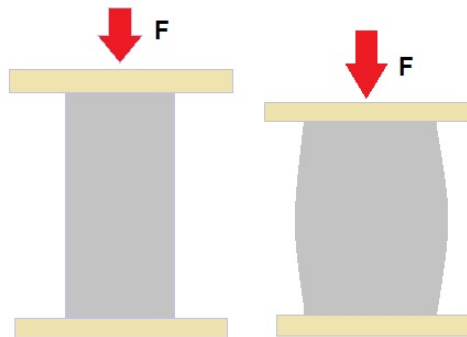


Figura 25: Ensayo de compresión.

4.5.3. Ensayo de flexión

Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal [18]. Para la realización de este ensayo existen dos métodos de aplicación:

1. Probetas apoyadas en sus extremos, sin tensión y cargadas en la mitad de su longitud, conocido como un ensayo de tres puntos, como se puede observar en la Figura 26.
2. Probetas apoyadas en sus extremos, sin tensión y cargadas en dos puntos equidistantes en los extremos, conocido como un ensayo de cuatro puntos.

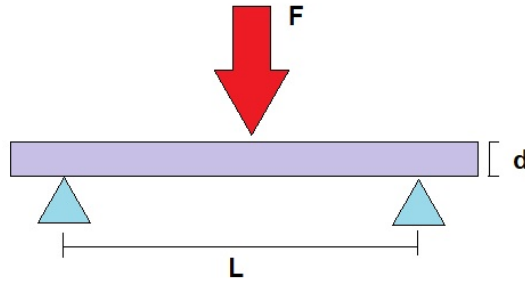


Figura 26: Ensayo de flexión: tres puntos.

Uno de los datos más importantes al realizar este ensayo es la resistencia flexional, la cual es una propiedad del material que se manifiesta como esfuerzos ocurridos justo antes de ceder a una prueba de flexión [18]. Es el esfuerzo más alto ocurrido dentro del material en su momento de fallo. Se representa mediante el símbolo sigma (σ).

En una muestra rectangular sometida a una carga de arqueamiento en tres puntos la resistencia flexional se obtiene:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (5)$$

En donde, F es la fuerza aplicada en el centro de la probeta en newtons (N), L es la longitud de la muestra en metros (m), b es la anchura de la muestra en metros (m) y d es el espesor de la muestra dada en metros cuadrados (m^2), la unidad obtenida dada en N/m^2 o Pascales (Pa).

4.5.4. Ensayo de corte

El ensayo de corte se emplea en la comprobación de tornillos, remaches, pasadores y chavetas para determinar la resistencia al corte del material y el comportamiento del material bajo esfuerzo de corte. Para ello, se generan en la probeta compresiones de corte por medio de esfuerzos cortantes, hasta que la probeta falla y se desgarran. La resistencia de un material frente al esfuerzo de corte se puede determinar con la ayuda de dos procedimientos: corte simple y corte doble [19]. El procedimiento de corte doble tiene una configuración como se muestra en la Figura 27.

En el procedimiento de corte doble, se realizan dos cortes transversales en las probetas. El cálculo de la resistencia de corte en ambos procedimientos se diferencia en el área de sección transversal aplicable. Se calcula de la siguiente forma:

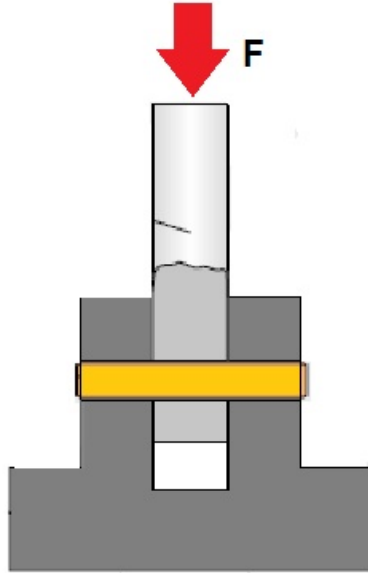


Figura 27: Ensayo de corte: configuración inicial.

$$\tau = \frac{F}{2A} \quad (6)$$

En donde, F es la fuerza aplicada en el ensayo en newtons (N) y A es área de la sección transversal dada en metros cuadrados (m^2).

4.5.5. Temperatura de transición vítrea

En los polímeros termoplásticos, una característica muy importante que determina su comportamiento mecánico es la temperatura de transición vítrea (T_g). Esta se define como la temperatura por encima de la cual los segmentos de las cadenas adquieren movimiento, pasando el polímero del estado vítreo al amorfo. Si un termoplástico se encuentra en una temperatura inferior a T_g , se encuentra en estado vítreo, en este estado se caracteriza por la rigidez y fragilidad del material. En cambio, si se encuentra por encima de T_g se encuentra en estado amorfo, que se caracteriza por una baja rigidez y mayores flexibilidad y ductilidad [20].

La fusión es una transición que se manifiesta en los polímeros cristalinos; ocurre cuando las cadenas poliméricas abandonan sus estructuras cristalinas y se convierten en un líquido desordenado. Algunos polímeros cristalinos contienen una porción amorfa, esto explica por qué una misma muestra de un polímero puede tener una T_g como una temperatura de fusión [20].

Marco metodológico

La realización del presente proyecto se hizo mediante la investigación en páginas de internet y bibliografía para la parte teórica. Se realizaron las probetas impresas en 3D en el makerspace "D-Hive". Las pruebas mecánicas y térmicas se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales 1, ambos ubicados en la Universidad del Valle de Guatemala.

Para la caracterización mecánica se sometieron a ensayos mecánicos las probetas impresas en 3D que se muestran en el Cuadro 4. Las normas que se siguieron para cada ensayo mecánico, fueron de tracción, flexión, compresión y corte.

Ensayo mecánico	Método de ensayo
Tracción	ISO 527-2:2012 [21]
Flexión	ISO 178:2010 [22]
Compresión	ASTM D695 [23]
Corte	ASTM D732 [24]

Cuadro 4: Métodos de ensayo para pruebas mecánicas

Dentro de cada norma se menciona la geometría óptima de las probetas para realizar dichas pruebas, y para obtener mayor cantidad de información se harán las mismas pruebas a piezas variando sus parámetros al ser impresos en 3D. Para la caracterización térmica se realizará aplicando calentamiento directo a las piezas fabricadas en PLA utilizando un horno convencional, esto para calentar al material cerca de su punto de fusión, o temperatura de transición y poder corroborar la temperatura máxima que soporta el PLA hasta que se deforme con respecto a la forma original.

Se recomienda hacer una comparación mecánica y térmica con otro material utilizado en la impresión 3D, como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) que resulta ser uno de los termoplásticos más usados para estos fines.

5.1. Geometría y muestra de probetas

Para los ensayos mecánicos se consideró la geometría y muestra dada por las normas anteriormente mencionadas, en las cuales hacen mención del número de especímenes óptimo para la recolección de resultados; el cual fue de cinco especímenes como mínimo para la caracterización correcta del material puesto a prueba. Considerando que se planeó modificar algunos parámetros en la impresión 3D, la muestra de las probetas fue distribuida como se muestra en el Cuadro 5.

Ensayo mecánico	Cantidad de probetas
Tracción	45
Flexión	45
Compresión	45
Corte	45
Temperatura	12

Cuadro 5: Muestra de probetas

Para la geometría de las probetas se seleccionaron las que mejor se adaptaban a la máquina de ensayos universal utilizada, en las siguientes figuras 28, 29, 30 y 31 se puede observar la geometría utilizada para la elaboración de probetas. A la probeta que se le realizaron cambios notables fue a la de flexión, ya que los soportes utilizados en la máquina de ensayos del laboratorio de materiales requiere que el largo mayor de la probeta sea de 15 cm y por ello se propuso un ancho mayor para poder mantener la relación como solicita la norma.

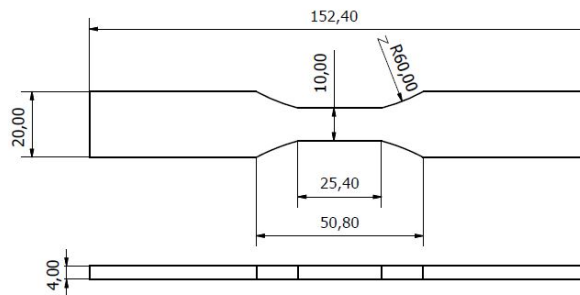


Figura 28: Probeta para ensayo de tracción.

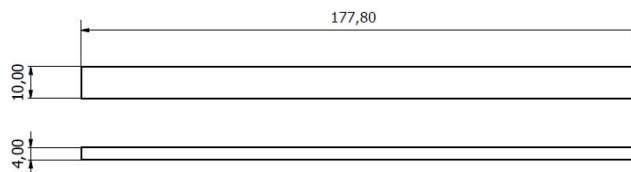


Figura 29: Probeta para ensayo de flexión.

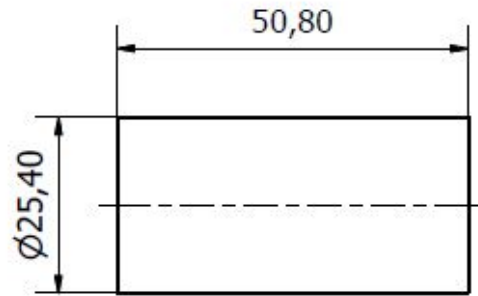


Figura 30: Probeta para ensayo de compresión.

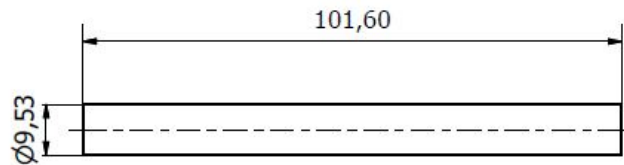


Figura 31: Probeta para ensayo de corte.

5.2. Proceso de impresión y parámetros modificados

Luego que se determinó la geometría de las probetas se procedió a utilizar el software Autodesk Inventor para realizar el respectivo modelo 3D de las probetas. Luego se obtuvo las probetas en formato .stl, que describe la geometría de los objetos creados y que el software Ultimaker Cura puede abrir para iniciar con la preparación 3D. Durante la preparación 3D se hicieron las modificaciones a los parámetros de impresión: patrón de relleno y el porcentaje del relleno, las cuales se puede observar en los Cuadros 6, 7, 8 y 9.

Tipo de probeta	Patrón	Relleno
Tracción	lineal	30 %
Tracción	concéntrico	30 %
Tracción	triangular	30 %
Tracción	lineal	60 %
Tracción	concéntrico	60 %
Tracción	triangular	60 %
Tracción	lineal	99 %
Tracción	concéntrico	99 %
Tracción	triangular	99 %

Cuadro 6: Parámetros modificados para probetas de tracción.

Al determinar los parámetros a modificar se procedió con la impresión 3D con las impresoras Ultimaker 3. Se imprimieron un total de 180 probetas que fueron utilizadas para la realización de los ensayos mecánicos.

Tipo de probeta	Patrón	Relleno
Flexión	lineal	30 %
Flexión	concéntrico	30 %
Flexión	triangular	30 %
Flexión	lineal	60 %
Flexión	concéntrico	60 %
Flexión	triangular	60 %
Flexión	lineal	99 %
Flexión	concéntrico	99 %
Flexión	triangular	99 %

Cuadro 7: Parámetros modificados para probetas de flexión.

Tipo de probeta	Patrón	Relleno
Compresión	lineal	30 %
Compresión	concéntrico	30 %
Compresión	triangular	30 %
Compresión	lineal	60 %
Compresión	concéntrico	60 %
Compresión	triangular	60 %
Compresión	lineal	99 %
Compresión	concéntrico	99 %
Compresión	triangular	99 %

Cuadro 8: Parámetros modificados para probetas de compresión.

Tipo de probeta	Patrón	Relleno
Corte	lineal	30 %
Corte	concéntrico	30 %
Corte	triangular	30 %
Corte	lineal	60 %
Corte	concéntrico	60 %
Corte	triangular	60 %
Corte	lineal	99 %
Corte	concéntrico	99 %
Corte	triangular	99 %

Cuadro 9: Parámetros modificados para probetas de corte.

Orientación del patrón de relleno

Dentro de la preparación de los modelos de las probetas normalizadas para ser impresas en 3D se consideró que la orientación de los patrones del relleno para las probetas de tracción sería como se muestra en la Figura 32 con vista en planta, además de tener un diagrama de cuerpo libre para observar en qué dirección será aplicada la fuerza durante el ensayo mecánico. Para las probetas de flexión se consideró la orientación de los patrones como se

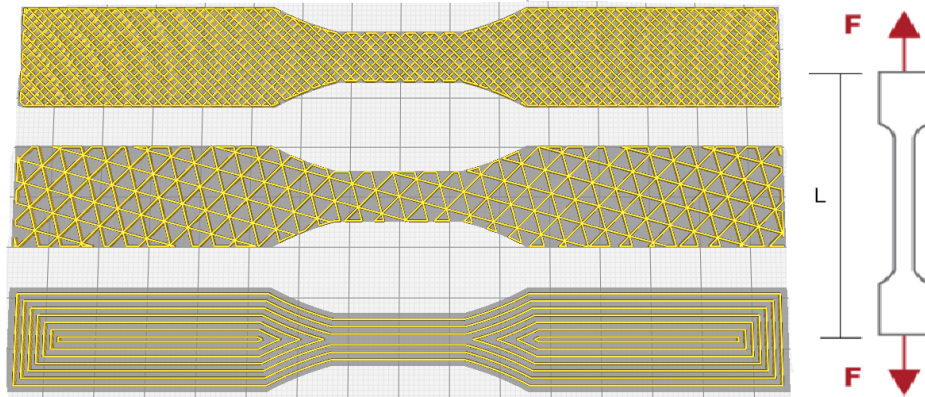


Figura 32: Orientación de los patrones en probeta de tracción.

muestra en la Figura 33 con vista en planta de las probetas, además del diagrama de cuerpo libre para observar en qué dirección estarán aplicadas las fuerzas durante el ensayo mecánico.

Para las probetas de compresión se consideró la orientación de los patrones como se muestra en la Figura 34 con vista en planta de las probetas, además del diagrama de cuerpo libre para observar en qué dirección estarán aplicadas las fuerzas durante el ensayo mecánico.

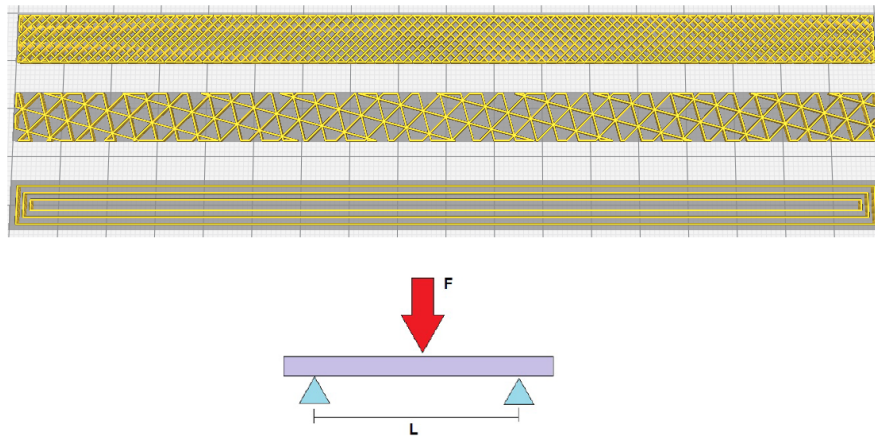


Figura 33: Orientación de los patrones en probeta de flexión.

Para las probetas de corte se consideró la orientación de los patrones como se muestra en la Figura 35 con vista en planta de las probetas, además del diagrama de cuerpo libre para observar en qué dirección estarán aplicadas las fuerzas durante el ensayo mecánico.

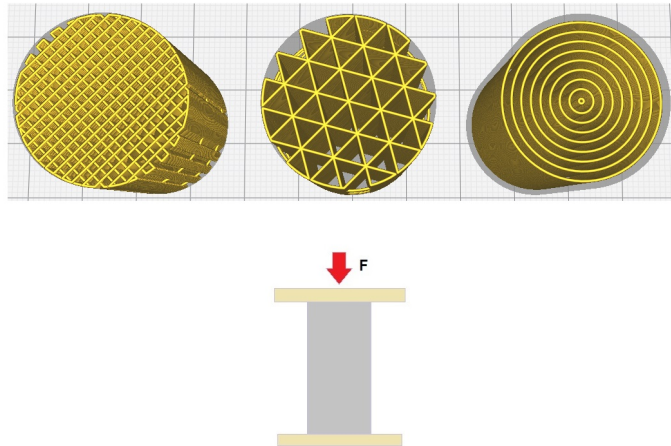


Figura 34: Orientación de los patrones en probeta de compresión.

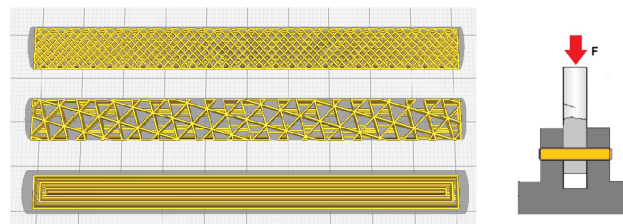


Figura 35: Orientación de los patrones en probeta de corte.

5.3. Procedimiento para ensayos realizados

Para la realización de los ensayos mecánicos se utilizó la máquina de ensayos universales que tiene el laboratorio de materiales 1 de la Universidad del Valle de Guatemala, se puede observar en la Figura 36.

1. Sensor de proximidad.
2. Puente móvil: es el encargado de la aplicación de la fuerza.
3. Tornillos guías, dependiendo del giro que apliquen la fuerza cambia de dirección.
4. Pantalla que despliega el valor de fuerza aplicada por la máquina.
5. Control de la máquina: maneja velocidades y aplica o retira la fuerza aplicada.

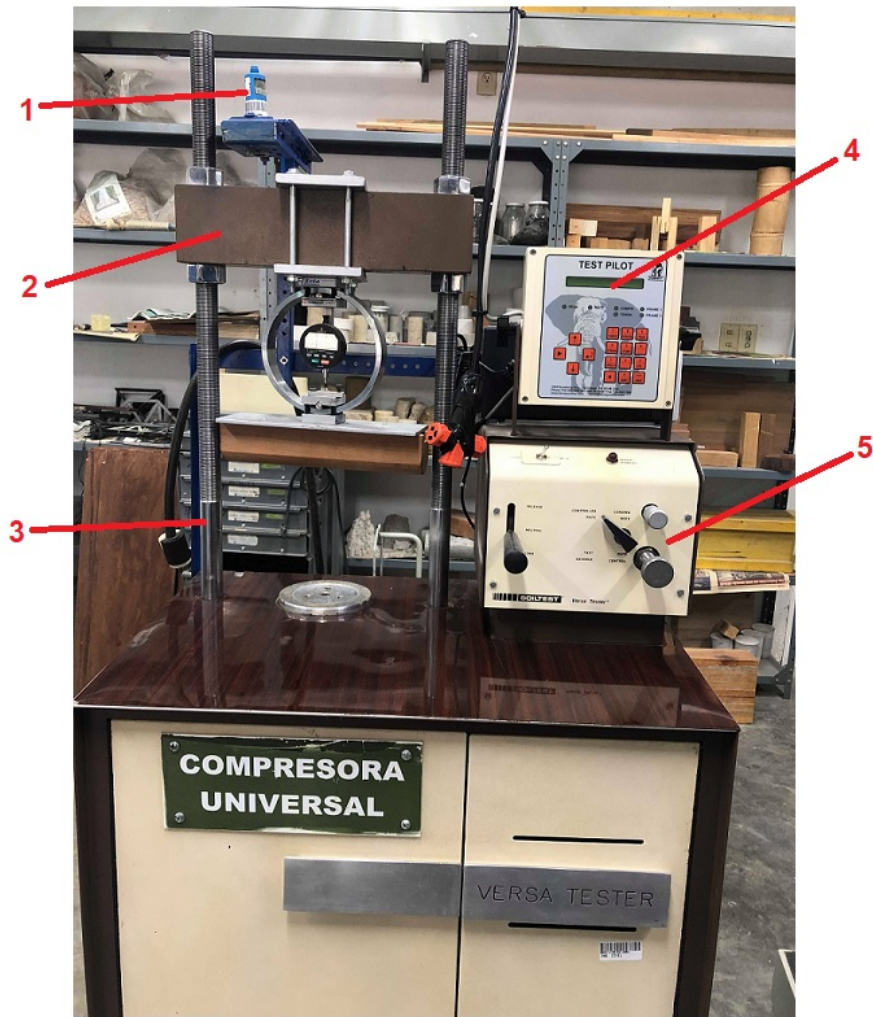


Figura 36: Máquina de ensayos universales.

Debido a que la máquina no es específica para un solo tipo de ensayo, es necesario incorporar algunos elementos para las pruebas mecánicas. En la Figura 37 se configuró la máquina de ensayos para hacer ensayos de compresión, la fuerza ejercida de compresión es por medio del puente móvil directamente sobre la pieza, y la pieza es colocada sobre un soporte.

Para los ensayos de tracción es necesario montar un marco metálico en la máquina de ensayos, y este ejerce de soporte para las mordazas que sostendrán la piezas como se puede observar en la Figura 38. Para este caso la mordaza superior es fija y la que realiza la fuerza de tracción es la mordaza inferior que está colocada sobre el puente móvil.

Para hacer los ensayos de corte fue necesaria la elaboración de platinas hechas a la medida para las probetas. Con el fin de aplicar una fuerza cortante a la probeta se colocaron dos platinas perpendiculares como se puede observar en la Figura 39, mientras el puente móvil aplica la fuerza a la platina y esta aplica una fuerza cortante a la probeta.



Figura 37: Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de compresión.

Para los ensayos de flexión fue necesario realizar una base de madera que sirvió como soportes para las probetas, y se obtuvo problemas con el sensor de la máquina ya que no era capaz de registrar la fuerza aplicada a las probetas, por lo que fue necesario montar un medidor de fuerza analógico para poder tomar los datos como se puede observar en la Figura 40, aunque sí fue necesaria la máquina de ensayos debido a que maneja la velocidad del ensayo y la fuerza aplicada

Luego de determinar las configuraciones necesarias para la realización de la máquina de ensayos, se procedió a tomar los datos de forma manual, la pantalla desplegaba la fuerza aplicada y el sensor también mostraba el alargamiento, y los datos brindados se tabularon de forma manual.

Para la prueba térmica fue utilizado un horno de convección que fue necesario para calentar las piezas, se llevaron a su temperatura de fusión la cual es donde el material empieza a derretirse y cambia de forma con respecto a su forma original. Para la medición de la temperatura fue utilizado un multímetro con medidor de temperatura, anotando la temperatura final a la que llegaban las probetas. La configuración utilizada fue como se muestra en la Figura 41.



Figura 38: Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de tracción.



Figura 41: Horno de convección y multímetro para prueba térmica.



Figura 39: Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de corte.



Figura 40: Máquina de ensayos universales configurada para ensayo de flexión.

Los ensayos mecánicos fueron realizados en el laboratorio de materiales 1, ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala. Se usó la máquina de ensayos universales versa tester. Se hicieron 180 ensayos mecánicos, los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera: 45 ensayos de tracción, 45 ensayos de compresión, 45 ensayos de corte, 45 ensayos de flexión y fueron puestas a prueba térmica 12 probetas más, para determinar las propiedades mecánicas y térmica del material PLA.

6.1. Resultados de ensayos de tracción

Se llevaron a cabo 45 ensayos de tracción, en los cuales se modificaron los parámetros: patrón de relleno y porcentaje de relleno. La máquina de ensayos brindó valores de fuerza aplicada en libras y alargamiento en milímetros, con estos datos se obtuvieron los valores de esfuerzos y deformaciones necesarios para la realización de curvas esfuerzo-deformación que se dividieron en porcentaje de relleno y se muestra cómo reaccionaron los distintos patrones de relleno al ensayo de tracción. Para las curvas se tomaron los valores medios de alargamiento de las probetas que fueron sometidas al ensayo. Para el 30% de infill se obtuvieron los Cuadros 10, 11 y 12, para el 60% de infill se obtuvieron los Cuadros 14, 15 y 16, y para el 99% de infill se obtuvieron los Cuadros 18, 19 y 20.

Con los valores de los cuadros fue posible la realización de las curvas de esfuerzo-deformación como se pueden observar en las Figuras 42, 43 y 44. Luego, se analizaron las curvas obtenidas para poder obtener propiedades mecánicas con respecto al ensayo de tracción del material PLA como se muestra en los Cuadros 13, 17 y 21.

Patrón triangular - 30 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
88.964	0.200	0.004	2.224
177.928	0.600	0.012	4.448
266.892	0.800	0.016	6.672
355.856	1.000	0.020	8.896
444.820	1.000	0.020	11.121
533.784	1.400	0.028	13.345
622.748	1.800	0.035	15.569
711.712	2.000	0.039	17.793
800.676	2.000	0.039	20.017
889.640	2.000	0.039	22.241

Cuadro 10: Ensayo de tracción: patrón triangular - 30 % de infill

Patrón lineal - 30 % infill			
fuerza (N)	Alargamiento(mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.000	0.000	2.224
177.928	0.800	0.016	4.448
266.892	0.800	0.016	6.672
355.856	0.800	0.016	8.896
444.820	1.000	0.020	11.121
533.784	1.200	0.024	13.345
622.748	1.600	0.031	15.569
711.712	2.000	0.039	17.793
800.676	2.800	0.055	20.017

Cuadro 11: Ensayo de tracción: patrón lineal - 30 % infill

Patrón concéntrico - 30 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.000	0.000	2.224
177.928	0.600	0.012	4.448
266.892	0.600	0.012	6.672
355.856	0.600	0.012	8.896
444.820	0.800	0.016	11.121
533.784	1.200	0.024	13.345
622.748	1.400	0.028	15.569
711.712	1.600	0.031	17.793
800.676	1.600	0.031	20.017
889.640	1.600	0.031	22.241
978.604	1.800	0.035	24.465
1067.568	2.600	0.051	26.689

Cuadro 12: Ensayo de tracción: patrón concéntrico - 30 % infill

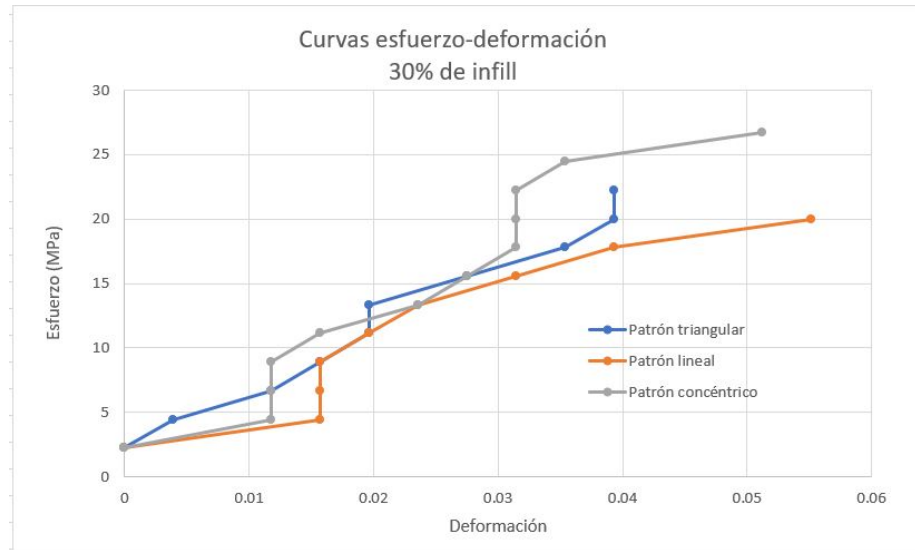


Figura 42: Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - 30 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 30 % de infill

Propiedades de tracción - 30 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	4.440 MPa	4.440 MPa	4.440 MPa
Módulo elástico	282.461 MPa	141.230 MPa	188.307 MPa
Resistencia a la tracción	22.241 MPa	20.000 MPa	26.690 MPa

Cuadro 13: Ensayo de tracción: propiedades mecánicas - 30 % infill

Patrón triangular - 60 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.000	0.000	2.224
177.928	0.800	0.016	4.448
266.892	0.800	0.016	6.672
355.856	1.000	0.020	8.896
444.820	1.000	0.020	11.121
533.784	1.200	0.024	13.345
622.748	1.400	0.028	15.569
711.712	1.800	0.035	17.793
800.676	1.800	0.035	20.017
889.640	2.400	0.047	22.241
978.604	3.000	0.059	24.465

Cuadro 14: Ensayo de tracción: patrón triangular - 60 % infill

Patrón lineal - 60 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.400	0.008	2.224
177.928	0.800	0.016	4.448
266.892	1.000	0.020	6.672
355.856	1.000	0.020	8.896
444.820	1.200	0.024	11.121
533.784	1.600	0.031	13.345
622.748	2.000	0.039	15.569

Cuadro 15: Ensayo de tracción: patrón lineal - 60 % infill

Patrón concéntrico - 60 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.000	0.000	2.224
177.928	0.000	0.000	4.448
266.892	0.000	0.000	6.672
355.856	0.600	0.012	8.896
444.820	0.800	0.016	11.121
533.784	1.000	0.020	13.345
622.748	1.000	0.020	15.569
711.712	1.200	0.024	17.793
800.676	1.400	0.028	20.017
889.640	1.600	0.031	22.241
978.604	2.200	0.043	24.465

Cuadro 16: Ensayo de tracción: patrón concéntrico - 60 % infill

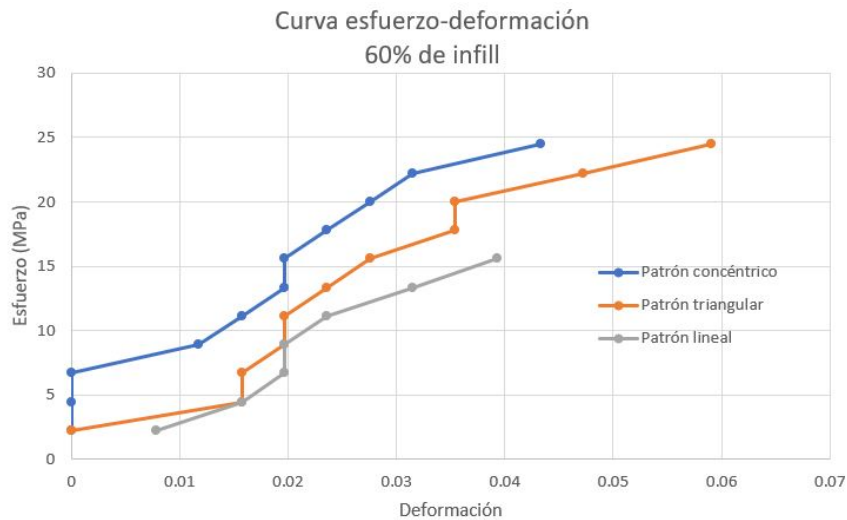


Figura 43: Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - 60 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 60 % de infill

Propiedades de tracción - 60 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	4.440 MPa	4.440 MPa	8.900 MPa
Módulo elástico	141.230 MPa	282.461 MPa	564.921 MPa
Resistencia a la tracción	24.470 MPa	15.570 MPa	24.470 MPa

Cuadro 17: Ensayo de tracción: propiedades mecánicas - 60 % infill

Patrón triangular - 99 % infill			
fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.000	0.000	2.224
177.928	0.600	0.012	4.448
266.892	0.600	0.012	6.672
355.856	0.800	0.016	8.896
444.820	1.000	0.020	11.121
533.784	1.200	0.024	13.345
622.748	1.800	0.035	15.569

Cuadro 18: Ensayo de tracción: patrón triangular - 99 % infill

Patrón lineal - 99 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.400	0.008	2.224
177.928	0.600	0.012	4.448
266.892	1.000	0.020	6.672
355.856	1.000	0.020	8.896
444.820	1.000	0.020	11.121
533.784	1.000	0.020	13.345
622.748	1.000	0.020	15.569
711.712	1.600	0.031	17.793
800.676	1.800	0.035	20.017
889.640	2.000	0.039	22.241
978.604	2.400	0.047	24.465
1067.568	2.800	0.055	26.689
1156.532	3.000	0.059	28.913

Cuadro 19: Ensayo de tracción: patrón lineal - 99 % infill

Patrón concéntrico - 99 % infill			
fuerza(N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
88.964	0.000	0.000	2.224
177.928	0.200	0.004	4.448
266.892	0.600	0.012	6.672
355.856	0.800	0.016	8.896
444.820	0.800	0.016	11.121
533.784	1.000	0.020	13.345
622.748	1.000	0.020	15.569
711.712	1.000	0.020	17.793
800.676	1.000	0.020	20.017
889.640	1.200	0.024	22.241
978.604	1.800	0.035	24.465
1067.568	2.000	0.039	26.689
1156.532	3.000	0.059	28.913

Cuadro 20: Ensayo de tracción: patrón concéntrico - 99 % infill

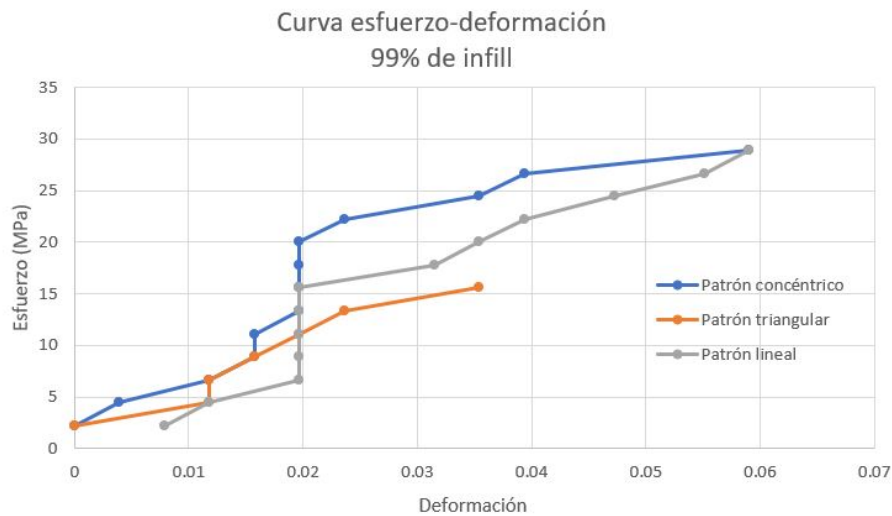


Figura 44: Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - 99 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 99 % de infill

Propiedades de tracción - 99 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	4.400 MPa	6.672 MPa	4.450 MPa
Módulo elástico	188.307 MPa	376.614 MPa	564.921 MPa
Resistencia a la tracción	15.570 MPa	28.910 MPa	28.910 MPa

Cuadro 21: Ensayo de tracción: propiedades mecánicas - 99 % infill

Hasta el momento se compararon los valores obtenidos por patrón de relleno, es decir,

dentro de las curvas de esfuerzo-deformación se agruparon los diferentes tipos de patrones y se pudo observar cómo varían entre diferentes tipos de rellenos a un mismo porcentaje de relleno, por ejemplo, cómo varían los patrones lineal, concéntrico y triangular a un 30 % de infill. A continuación, se muestra una comparación entre los diferentes porcentajes de relleno a un mismo patrón, cómo varía el patrón triangular a un ensayo de tracción cuando las probetas tienen un 30 %, 60 % y 99 % de infill en una misma curva de esfuerzo-deformación, cómo se puede observar en la Figura 45. En la Figura 46 se puede observar cómo varía el patrón lineal al variar el porcentaje de infill y en la Figura 47 se puede observar cómo varía el patrón concéntrico al variar el porcentaje de infill.

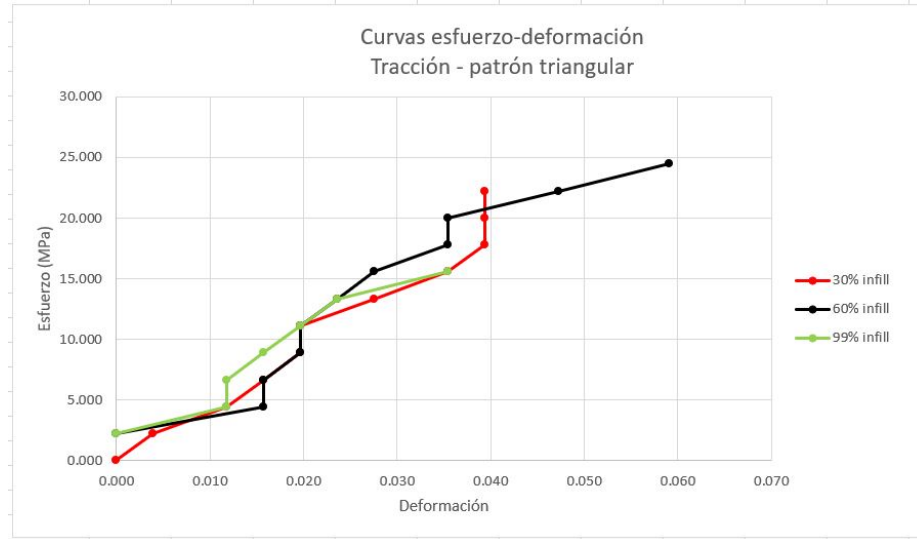


Figura 45: Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - patrón triangular
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno triangular.

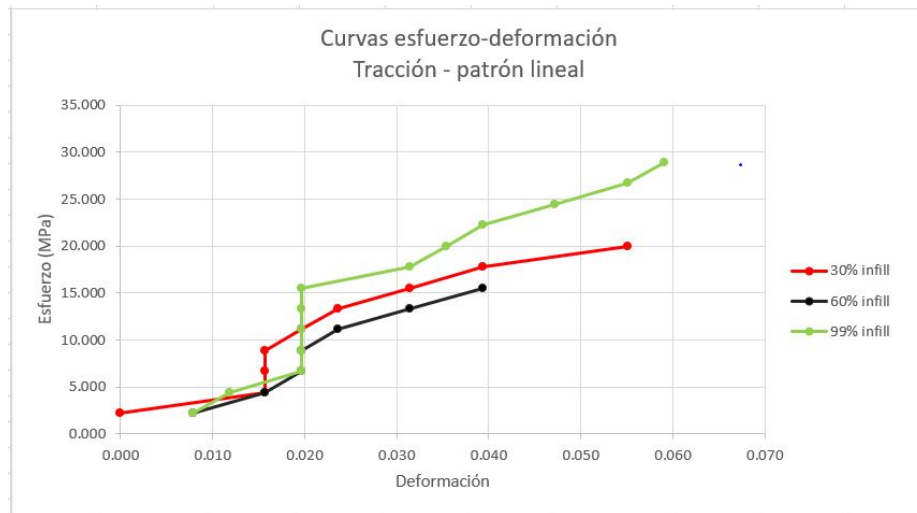


Figura 46: Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - patrón lineal
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno lineal.

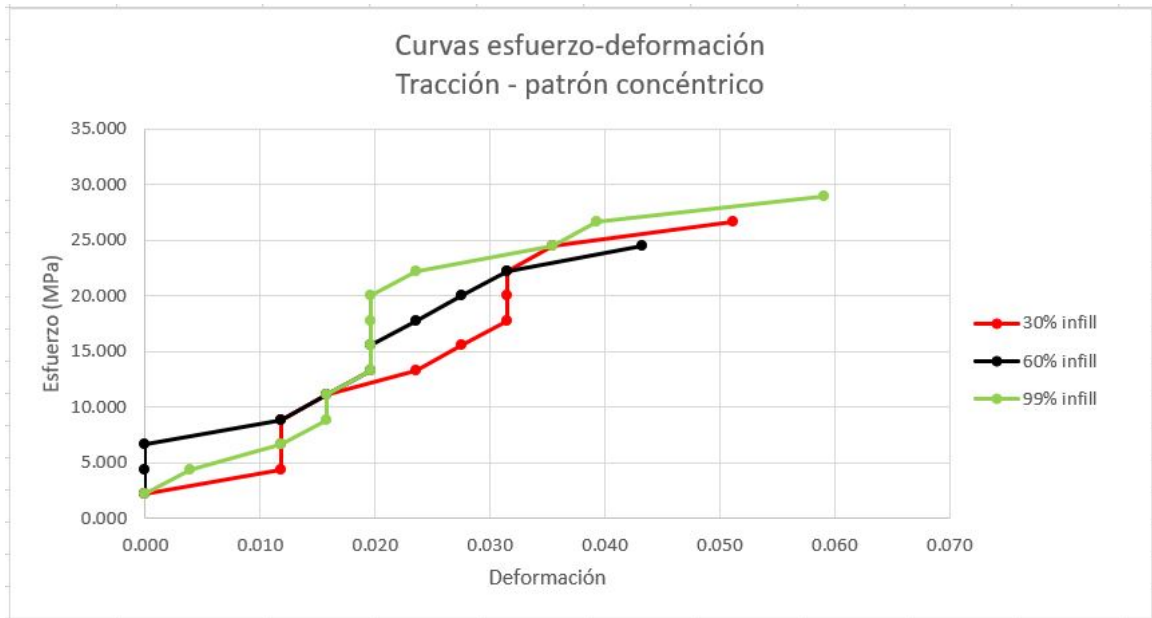


Figura 47: Ensayo de tracción: curva esfuerzo-deformación - patrón concéntrico
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno concéntrico.

6.2. Resultados de ensayos de compresión

Para el estudio de compresión se realizaron 45 ensayos, en los cuales se modificaron los parámetros: patrón de relleno y porcentaje de relleno. Durante los ensayos a las probetas se arrojaron datos de fuerza aplicado en libras y alargamiento en milímetros, al ser ensayo de compresión ese alargamiento debería tener un signo negativo, por conveniencia se tomó como positivo. Se realizaron todos los ensayos y se tomó el valor medio del alargamiento para poder realizar los Cuadros 22, 23 y 24 para el 30 % de infill, para el 60 % de infill los Cuadros 25, 26 y 27, y para el 99 % de infill los Cuadros 30, 31 y 32.

Como se pudo observar en las tablas se calcularon los valores de esfuerzo y deformación para poder realizar curvas esfuerzo-deformación como se pueden observar en las Figuras 48, 49 y 50 en los cuales se puede observar cómo se comportaron los distintos patrones de relleno a diferentes porcentajes de relleno a los ensayos de compresión.

Hasta el momento se compararon los valores obtenidos por patrón de relleno, es decir, dentro de las curvas de esfuerzo-deformación se agruparon los diferentes tipos de patrones y se pudo observar cómo varían entre diferentes tipos de rellenos a un mismo porcentaje de relleno, por ejemplo, cómo varían los patrones lineal, concéntrico y triangular a un 30 % de infill. A continuación, se muestra una comparación entre los diferentes porcentajes de relleno a un mismo patrón, cómo varía el patrón triangular a un ensayo de compresión cuando las probetas tienen un 30 %, 60 % y 99 % de infill en una misma curva de esfuerzo-deformación, cómo se puede observar en la figura 51. En la Figura 52 se puede observar cómo varía el patrón lineal al variar el porcentaje de infill y en la Figura 53 se puede observar cómo varía el patrón concéntrico al variar el porcentaje de infill.

Patrón triangular - 30 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
889.640	0.800	0.016	1.756
1779.280	1.000	0.020	3.511
2668.920	1.000	0.020	5.267
3558.560	1.000	0.020	7.023
4448.200	1.600	0.031	8.779
5337.840	2.000	0.039	10.534
6227.480	2.000	0.039	12.290
7117.120	2.000	0.039	14.046
8006.760	2.000	0.039	15.802
8896.400	2.000	0.039	17.557
9786.040	2.000	0.039	19.313
10675.680	2.000	0.039	21.069
11565.320	2.000	0.039	22.824
12454.960	2.000	0.039	24.580
13344.600	2.000	0.039	26.336
14234.240	2.400	0.047	28.092
15123.880	3.000	0.059	29.847
16013.520	3.000	0.059	31.603
16903.160	3.200	0.063	33.359
17792.800	3.600	0.071	35.114

Cuadro 22: Ensayo de compresión: patrón triangular - 30 % infill

Patrón lineal - 30 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
889.640	1.000	0.020	1.756
1779.280	1.400	0.028	3.511
2668.920	1.800	0.035	5.267
3558.560	2.000	0.039	7.023
4448.200	2.000	0.039	8.779
5337.840	2.000	0.039	10.534
6227.480	2.000	0.039	12.290
7117.120	2.000	0.039	14.046
8006.760	2.200	0.043	15.802
8896.400	2.200	0.043	17.557
9786.040	2.800	0.055	19.313
10675.680	2.800	0.055	21.069
11565.320	3.000	0.059	22.824
12454.960	3.600	0.071	24.580

Cuadro 23: Ensayo de compresión: patrón lineal - 30 % infill

Patrón concéntrico - 30 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
889.640	0.800	0.016	1.756
1779.280	1.400	0.028	3.511
2668.920	1.400	0.028	5.267
3558.560	1.400	0.028	7.023
4448.200	1.400	0.028	8.779
5337.840	1.400	0.028	10.534
6227.480	1.400	0.028	12.290
7117.120	1.600	0.031	14.046
8006.760	1.800	0.035	15.802
8896.400	2.000	0.039	17.557
9786.040	2.400	0.047	19.313
10675.680	2.400	0.047	21.069
11565.320	2.600	0.051	22.824
12454.960	3.000	0.059	24.580

Cuadro 24: Ensayo de compresión: patrón concéntrico - 30 % infill



Figura 48: Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - 30 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 30 % de infill

Patrón triangular - 60 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
889.640	0.400	0.008	1.756
1779.280	1.000	0.020	3.511
2668.920	1.000	0.020	5.267
3558.560	1.000	0.020	7.023
4448.200	1.000	0.020	8.779
5337.840	1.000	0.020	10.534
6227.480	1.400	0.028	12.290
7117.120	2.000	0.039	14.046
8006.760	2.000	0.039	15.802
8896.400	2.000	0.039	17.557
9786.040	2.200	0.043	19.313
10675.680	2.800	0.055	21.069
11565.320	3.600	0.071	22.824

Cuadro 25: Ensayo de compresión: patrón triangular - 60 % infill

Patrón lineal - 60 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
889.640	0.800	0.016	1.756
1779.280	1.000	0.020	3.511
2668.920	1.000	0.020	5.267
3558.560	1.000	0.020	7.023
4448.200	1.000	0.020	8.779
5337.840	1.600	0.031	10.534
6227.480	1.800	0.035	12.290
7117.120	1.800	0.035	14.046
8006.760	1.800	0.035	15.802
8896.400	2.000	0.039	17.557
9786.040	2.000	0.039	19.313
10675.680	2.400	0.047	21.069
11565.320	3.000	0.059	22.824
12454.960	3.400	0.067	24.580
13344.600	3.800	0.075	26.336

Cuadro 26: Ensayo de compresión: patrón lineal - 60 % infill

Patrón concéntrico - 60 % de infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
889.640	1.000	0.020	1.756
1779.280	1.000	0.020	3.511
2668.920	1.000	0.020	5.267
3558.560	1.200	0.024	7.023
4448.200	2.000	0.039	8.779
5337.840	2.000	0.039	10.534
6227.480	2.000	0.039	12.290
7117.120	2.000	0.039	14.046
8006.760	2.000	0.039	15.802
8896.400	2.000	0.039	17.557
9786.040	2.000	0.039	19.313
10675.680	2.000	0.039	21.069
11565.320	2.000	0.039	22.824
12454.960	2.000	0.039	24.580
13344.600	2.400	0.047	26.336
14234.240	2.400	0.047	28.092
15123.880	2.800	0.055	29.847
16013.520	2.800	0.055	31.603
16903.160	3.200	0.063	33.359
17792.800	3.400	0.067	35.114

Cuadro 27: Ensayo de compresión: patrón concéntrico - 60 % infill

Propiedades de compresión - 30 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	1.756 MPa	1.756 MPa	3.511 MPa
Módulo elástico	111.488 MPa	89.191 MPa	127.415 MPa
Resistencia a la compresión	35.114 MPa	24.580 MPa	24.580 MPa

Cuadro 28: Ensayo de compresión: propiedades mecánicas - 30 % infill

Propiedades de compresión - 60 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	1.756 MPa	1.756 MPa	1.756 MPa
Módulo elástico	222.977 MPa	111.488 MPa	89.191 MPa
Resistencia a la compresión	22.824 MPa	26.336 MPa	35.114 MPa

Cuadro 29: Ensayo de compresión: propiedades mecánicas - 60 % infill

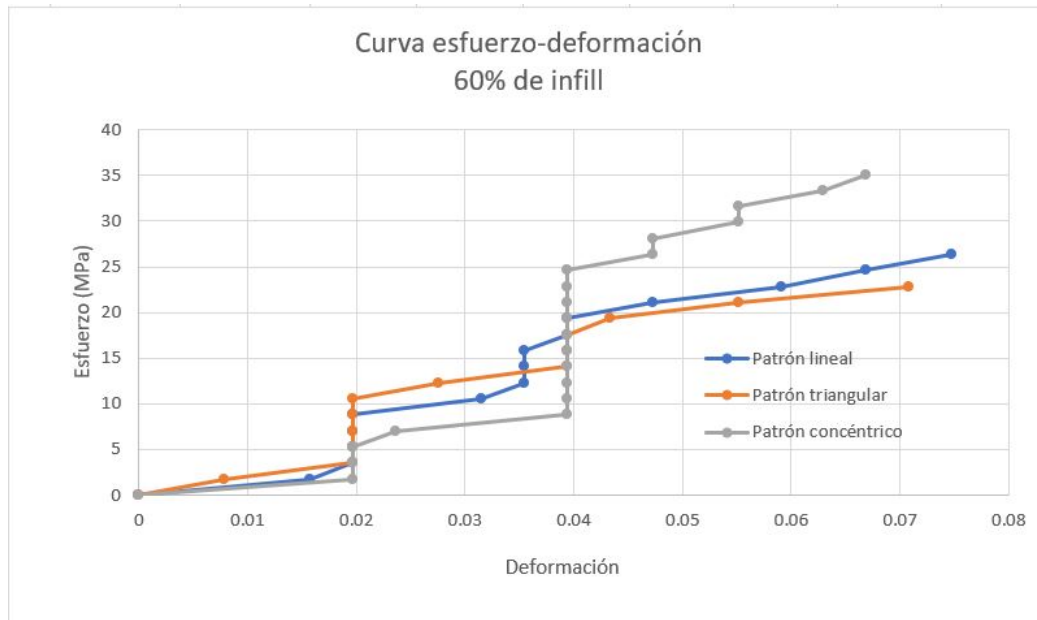


Figura 49: Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - 60 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 60 % de infill

Patrón triangular - 99 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
889.640	0.800	0.016	1.756
1779.280	1.000	0.020	3.511
2668.920	1.600	0.031	5.267
3558.560	1.600	0.031	7.023
4448.200	1.800	0.035	8.779
5337.840	1.800	0.035	10.534
6227.480	1.800	0.035	12.290
7117.120	1.800	0.035	14.046
8006.760	2.200	0.043	15.802
8896.400	2.400	0.047	17.557
9786.040	2.400	0.047	19.313
10675.680	2.400	0.047	21.069
11565.320	2.600	0.051	22.824
12454.960	2.600	0.051	24.580
13344.600	2.600	0.051	26.336
14234.240	3.200	0.063	28.092
15123.880	3.400	0.067	29.847
16013.520	3.600	0.071	31.603
16903.160	4.200	0.083	33.359

Cuadro 30: Ensayo de compresión: patrón triangular - 99 % infill

Patrón lineal - 99 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
889.640	1.000	0.020	1.756
1779.280	1.400	0.028	3.511
2668.920	2.000	0.039	5.267
3558.560	2.000	0.039	7.023
4448.200	2.000	0.039	8.779
5337.840	2.000	0.039	10.534
6227.480	2.000	0.039	12.290
7117.120	2.000	0.039	14.046
8006.760	2.000	0.039	15.802
8896.400	2.000	0.039	17.557
9786.040	2.000	0.039	19.313
10675.680	2.000	0.039	21.069
11565.320	2.200	0.043	22.824
12454.960	2.600	0.051	24.580
13344.600	2.600	0.051	26.336
14234.240	2.600	0.051	28.092
15123.880	2.600	0.051	29.847
16013.520	2.800	0.055	31.603
16903.160	3.000	0.059	33.359
17792.800	3.200	0.063	35.114
18682.440	3.400	0.067	36.870
19572.080	3.600	0.071	38.626
20461.720	4.400	0.087	40.382
21351.360	4.800	0.094	42.137
22241.000	5.800	0.114	43.893
23130.640	6.600	0.130	45.649

Cuadro 31: Ensayo de compresión: patrón lineal - 99 % infill

Patrón concéntrico - 99 % infill			
Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
889.640	1.000	0.020	1.756
1779.280	1.600	0.031	3.511
2668.920	2.000	0.039	5.267
3558.560	2.000	0.039	7.023
4448.200	2.000	0.039	8.779
5337.840	2.000	0.039	10.534
6227.480	2.000	0.039	12.290
7117.120	2.000	0.039	14.046
8006.760	2.000	0.039	15.802
8896.400	2.000	0.039	17.557
9786.040	2.000	0.039	19.313
10675.680	2.200	0.043	21.069
11565.320	2.400	0.047	22.824
12454.960	2.600	0.051	24.580
13344.600	2.800	0.055	26.336
14234.240	2.800	0.055	28.092
15123.880	3.200	0.063	29.847
16013.520	3.600	0.071	31.603
16903.160	4.000	0.079	33.359
17792.800	4.800	0.094	35.114
18682.440	5.000	0.098	36.870

Cuadro 32: Ensayo de compresión: patrón concéntrico - 99 % infill

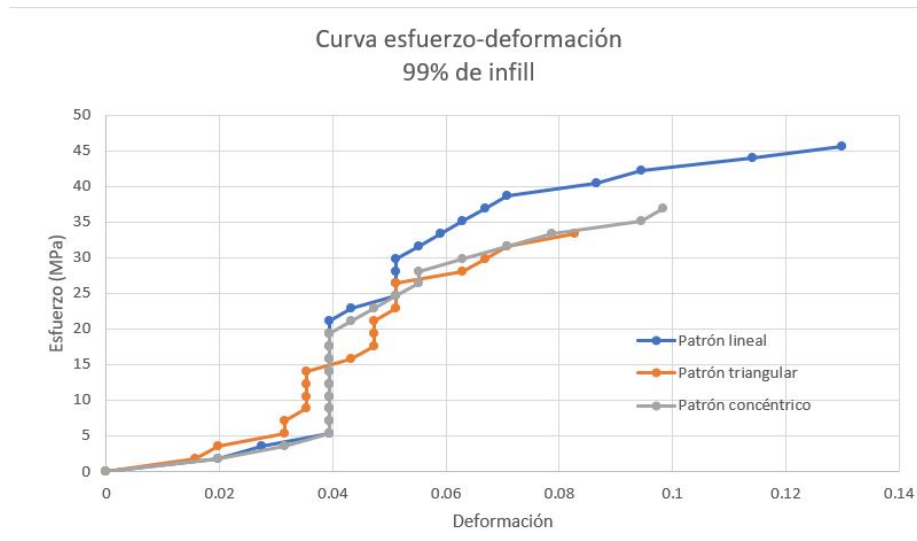


Figura 50: Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - 99 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 99 % de infill

Propiedades de compresión - 99% infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	1.756 MPa	1.756 MPa	1.756 MPa
Módulo elástico	111.488 MPa	89.191 MPa	89.191 MPa
Resistencia a la compresión	33.359 MPa	45.649 MPa	36.870 MPa

Cuadro 33: Ensayo de compresión: propiedades mecánicas - 99% infill

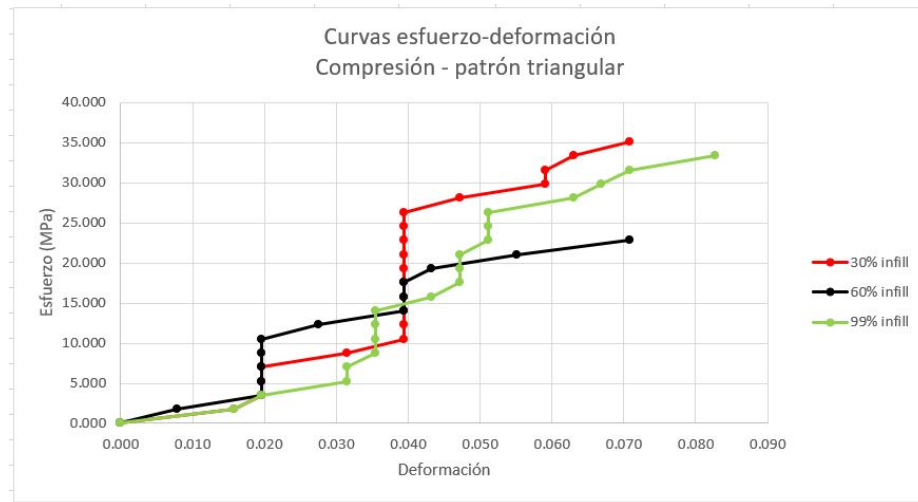


Figura 51: Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - patrón triangular
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno triangular.

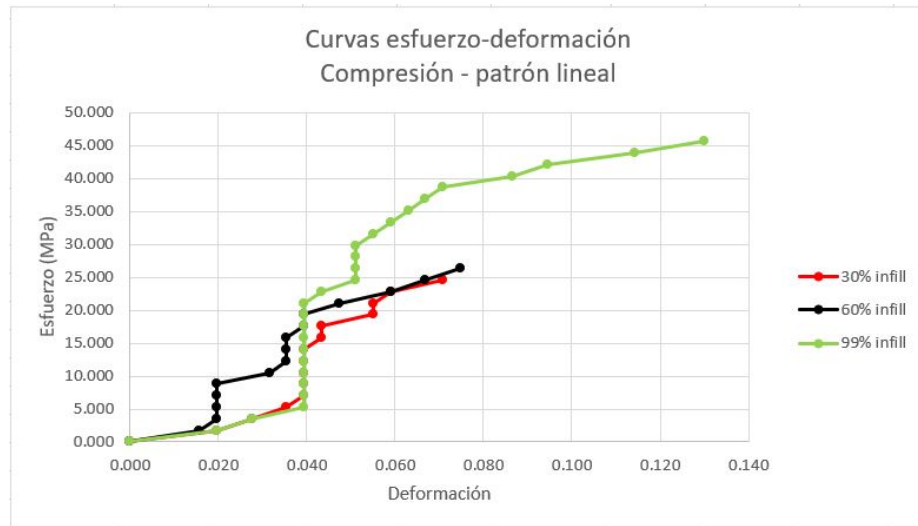


Figura 52: Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - patrón lineal
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno lineal.

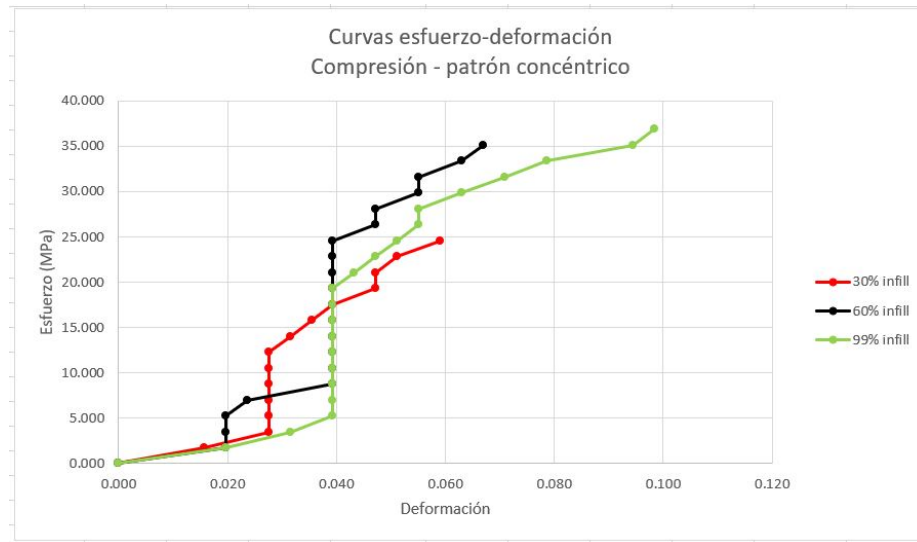


Figura 53: Ensayo de compresión: curva esfuerzo-deformación - patrón concéntrico
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno concéntrico.

6.3. Resultados de ensayos de corte

Se llevaron a cabo 45 ensayos de corte, en los cuales fueron modificados los parámetros de patrón de relleno y porcentaje de relleno para la realización de las probetas que fueron puestas a prueba. Para este tipo de ensayo no es posible la realización de curvas esfuerzo-deformación, ya que el fin del ensayo es determinar la resistencia al corte del material, por lo que solamente se consideró el valor de la fuerza aplicada en libras, para luego determinar esfuerzos. Los valores mostrados son valores medios de las pruebas realizadas como se pueden mostrar en las Figuras 54, 55 y 56 se muestran las gráficas según su porcentaje de relleno, su patrón de relleno y el esfuerzo medio máximo que determinó la resistencia al corte de PLA.

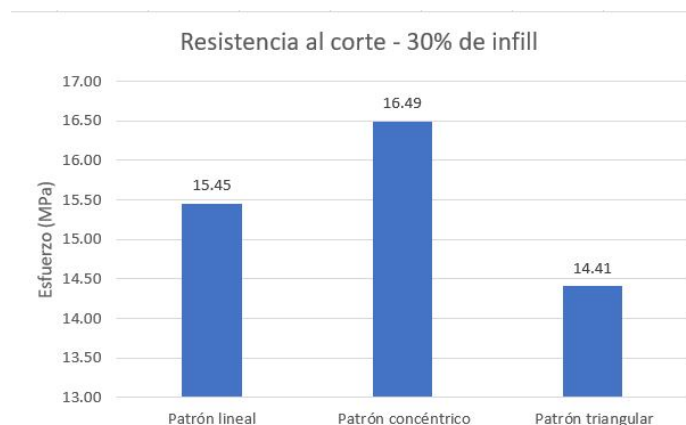


Figura 54: Ensayo de corte: diferentes patrones al 30% infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de relleno y sus esfuerzos máximos al corte

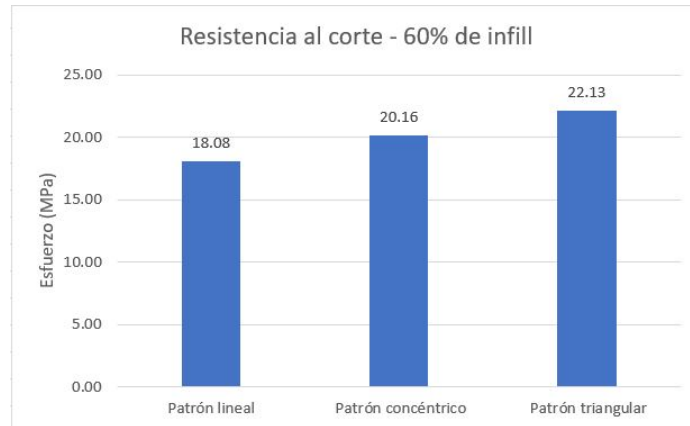


Figura 55: Ensayo de corte: diferentes patrones al 60 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de relleno y sus esfuerzos máximos al corte

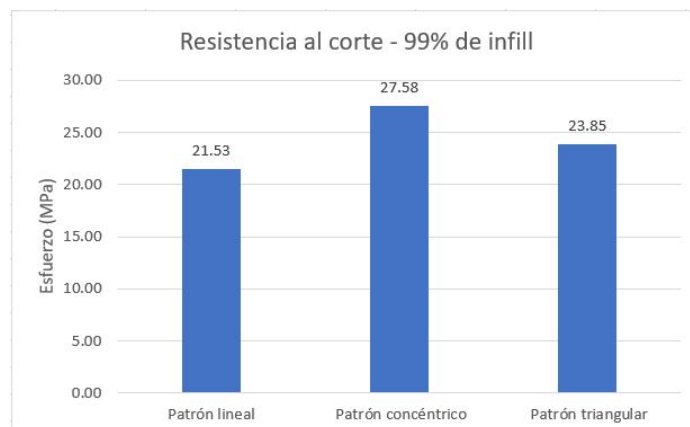


Figura 56: Ensayo de corte: diferentes patrones al 99 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de relleno y sus esfuerzos máximos al corte

6.4. Resultados de ensayos de flexión

Se llevaron a cabo 45 ensayos de flexión, en los cuales se modificaron los parámetros: patrón de relleno y porcentaje de relleno para la realización de las probetas. Durante los ensayos realizados, la máquina de ensayos brindó datos de fuerza aplicada en libras y deflexiones en milímetros, con los datos proporcionados se pudieron obtener esfuerzos y deformaciones para poder realizar las curvas esfuerzo-deformación para las cuales se utilizaron valores medios de las deflexiones para poder realizar los Cuadros 34, 35 y 36 correspondientes para el 30 % del infill, los resultados con el 60 % de infill se pueden observar en los Cuadros 38, 39 y 40, y para el 99 % de infill se obtuvieron los Cuadros 42, 44 y 43.

Con los valores de los cuadros fue posible realizar las curvas de esfuerzo-deformación como se pueden observar en las Figuras 57, 58 y 59. Luego se analizaron las curvas para poder obtener propiedades mecánicas con respecto al ensayo de flexión que se realizaron a las probetas del material PLA como se observa en los Cuadros 37, 41 y 45.

Patrón triangular - 30 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
8.896	1.600	0.002	12.711
17.793	3.000	0.003	25.421
26.689	4.200	0.004	38.132
35.586	6.200	0.006	50.843
44.482	10.400	0.011	63.554
53.378	15.200	0.016	76.264
62.275	20.600	0.021	88.975

Cuadro 34: Ensayo de flexión: patrón triangular - 30 % infill

Patrón lineal - 30 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
8.896	1.400	0.001	12.711
17.793	2.800	0.003	25.421
26.689	4.800	0.005	38.132
35.586	8.000	0.008	50.843
44.482	12.200	0.013	63.554
53.378	19.400	0.020	76.264

Cuadro 35: Ensayo de flexión: patrón lineal - 30 % infill

Patrón concéntrico - 30 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
8.896	2.400	0.002	12.711
17.793	4.200	0.004	25.421
26.689	5.600	0.006	38.132
35.586	7.400	0.008	50.843
44.482	10.800	0.011	63.554
53.378	14.200	0.015	76.264
62.275	22.600	0.023	88.975

Cuadro 36: Ensayo de flexión: patrón concéntrico - 30 % infill

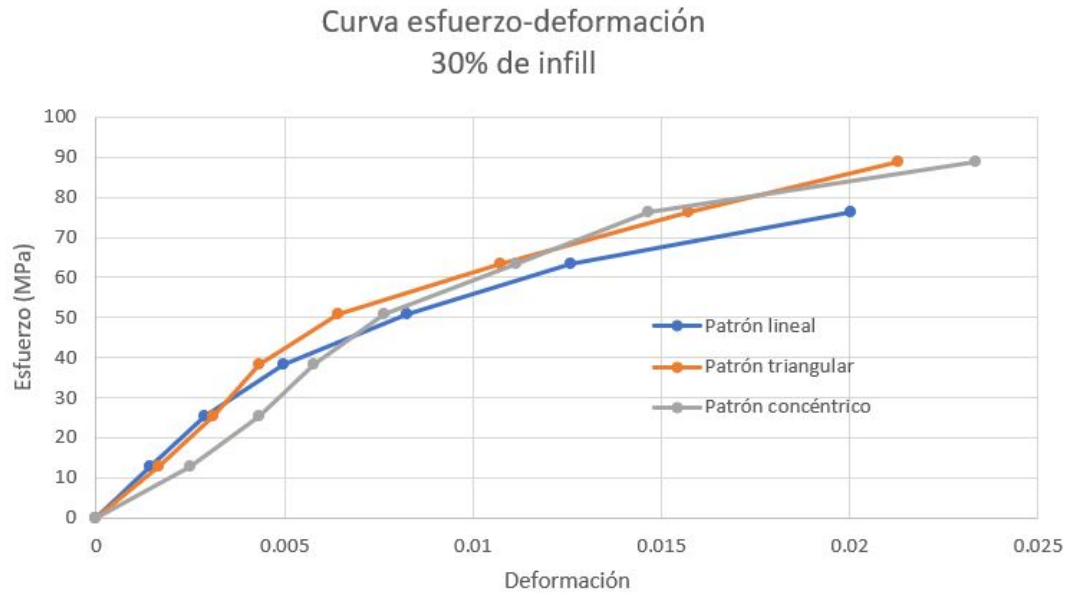


Figura 57: Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - 30 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 30 % de infill

Propiedades de flexión - 30 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	25.421 MPa	25.421 MPa	25.421 MPa
Módulo elástico	8200.456 MPa	8786.202 MPa	5857.468 MPa
Resistencia a la flexión	88.975 MPa	76.260 MPa	88.975 MPa

Cuadro 37: Ensayo de flexión: propiedades mecánicas - 30 % infill

Patrón triangular - 60 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
8.896	1.600	0.002	12.711
17.793	2.600	0.003	25.421
26.689	4.600	0.005	38.132
35.586	6.600	0.007	50.843
44.482	9.000	0.009	63.554
53.378	13.400	0.014	76.264

Cuadro 38: Ensayo de flexión: patrón triangular - 60 % infill

Patrón lineal - 60 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
8.896	2.000	0.002	12.711
17.793	3.400	0.004	25.421
26.689	4.800	0.005	38.132
35.586	8.000	0.008	50.843
44.482	12.800	0.013	63.554
53.378	17.800	0.018	76.264

Cuadro 39: Ensayo de flexión: patrón lineal - 60 % infill

Patrón concéntrico - 60 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
8.896	1.800	0.002	12.711
17.793	3.000	0.003	25.421
26.689	4.400	0.005	38.132
35.586	5.200	0.005	50.843
44.482	8.600	0.009	63.554
53.378	11.000	0.011	76.264
62.275	17.200	0.018	88.975
71.171	18.000	0.019	101.686
80.068	23.600	0.024	114.397

Cuadro 40: Ensayo de flexión: patrón concéntrico - 60 % infill



Figura 58: Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - 60 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 60 % de infill

Propiedades de flexión - 60 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	12.71 MPa	12.71 MPa	12.71 MPa
Módulo elástico	7687.927 MPa	6150.342 MPa	6833.713 MPa
Resistencia a la flexión	76.264 MPa	76.264 MPa	114.397 MPa

Cuadro 41: Ensayo de flexión: propiedades mecánicas - 60 % infill

Patrón triangular - 99 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
8.896	2.600	0.003	12.711
17.793	4.000	0.004	25.421
26.689	5.600	0.006	38.132
35.586	7.400	0.008	50.843
44.482	10.400	0.011	63.554
53.378	13.600	0.014	76.264
62.275	16.600	0.017	88.975
71.171	22.200	0.023	101.686
80.068	25.800	0.027	114.397

Cuadro 42: Ensayo de flexión: patrón triangular - 99 % infill



Figura 59: Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - 99 % infill
Gráfica comparativa entre los tipos de patrones de rellenos utilizados con un 99 % de infill

Patrón concéntrico - 99 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
8.896	2.000	0.002	12.711
17.793	3.400	0.004	25.421
26.689	5.200	0.005	38.132
35.586	7.200	0.007	50.843
44.482	11.200	0.012	63.554
53.378	15.600	0.016	76.264
62.275	18.600	0.019	88.975

Cuadro 43: Ensayo de flexión: patrón concéntrico - 99 % infill

Patrón lineal - 99 % infill			
Fuerza (N)	Deflexión (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000
8.896	2.400	0.002	12.711
17.793	3.800	0.004	25.421
26.689	6.000	0.006	38.132
35.586	9.800	0.010	50.843
44.482	14.000	0.014	63.554
53.378	17.600	0.018	76.264
62.275	24.200	0.025	88.975

Cuadro 44: Ensayo de flexión: patrón lineal - 99 % infill

Propiedades de flexión - 99 % infill			
Patrón	Triangular	Lineal	Concéntrico
Punto de fluencia	12.71 MPa	12.71 MPa	12.71 MPa
Módulo elástico	4731.032 MPa	5125.285 MPa	6150.342 MPa
Resistencia a la flexión	114.397 MPa	88.975 MPa	88.975 MPa

Cuadro 45: Ensayo de flexión: propiedades mecánicas - 99 % infill

Hasta el momento se compararon los valores obtenidos por patrón de relleno, es decir, dentro de las curvas de esfuerzo-deformación se agruparon los diferentes tipos de patrones y se pudo observar como varían entre diferentes tipos de rellenos a un mismo porcentaje de relleno, por ejemplo, cómo varían los patrones lineal, concéntrico y triangular a un 30 % de infill. A continuación, se muestra una comparación en entre los diferentes porcentajes de relleno a un mismo patrón, cómo varía el patrón triangular a un ensayo de compresión cuando las probetas tienen un 30 %, 60 % y 99 % de infill en una misma curva de esfuerzo-deformación, como se puede observar en la Figura 51. En la Figura 52 se puede observar cómo varía el patrón lineal al variar el porcentaje de infill y en la Figura 53 se puede observar cómo varía el patrón concéntrico al variar el porcentaje de infill.

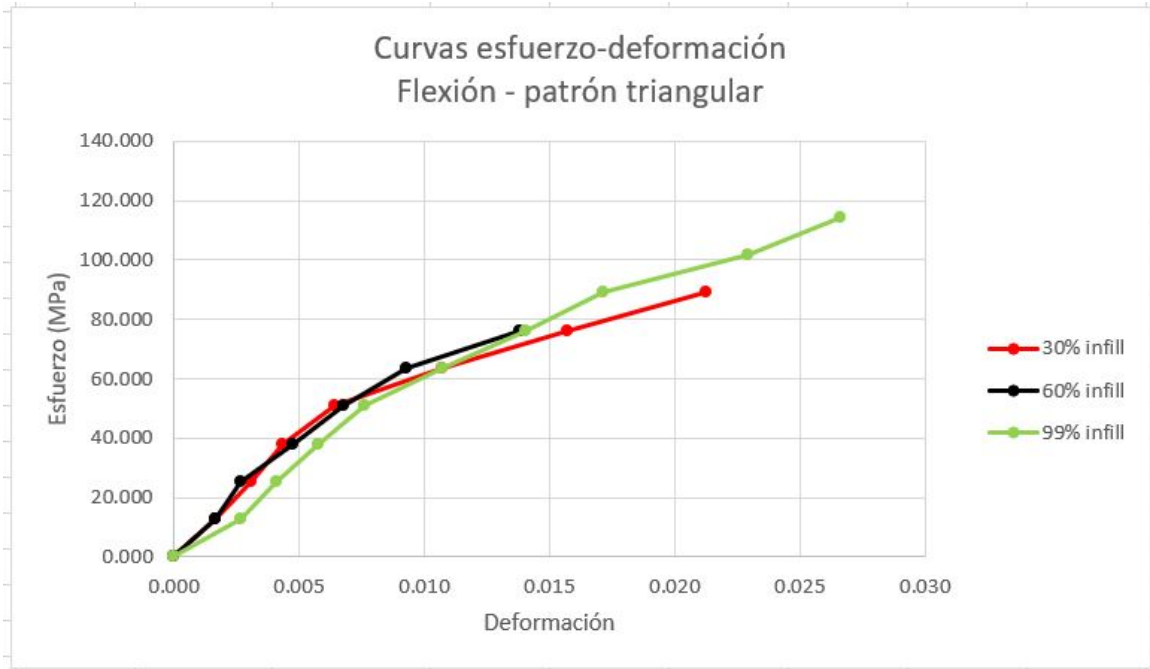


Figura 60: Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - patrón triangular
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno triangular.



Figura 61: Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - patrón lineal
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno lineal.

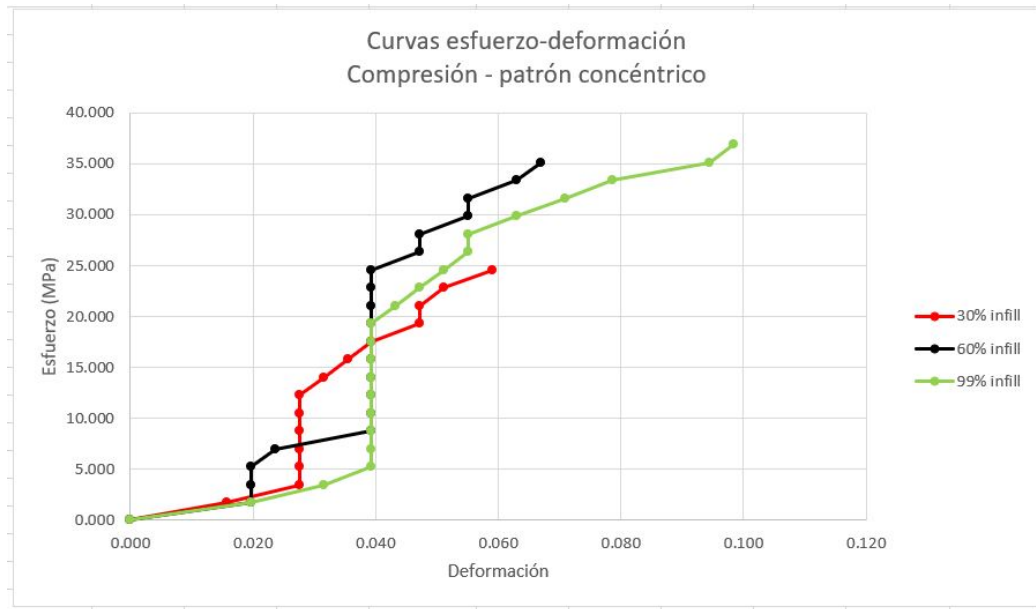


Figura 62: Ensayo de flexión: curva esfuerzo-deformación - patrón concéntrico
Gráfica comparativa entre los porcentajes de relleno del patrón de relleno concéntrico.

6.5. Resultados de temperatura

Para los ensayos de temperatura fueron utilizadas 12 probetas, se utilizó un horno convencional en donde fueron puestas las probetas y se midió la temperatura, y se obtuvieron los siguientes datos de temperatura de fusión del PLA como se muestra en la Figura 63. Se puede observar la temperatura mínima necesaria para que el material se pudiese deformar y de esa manera obtener la temperatura de transición entre su forma original y su forma amorfa.

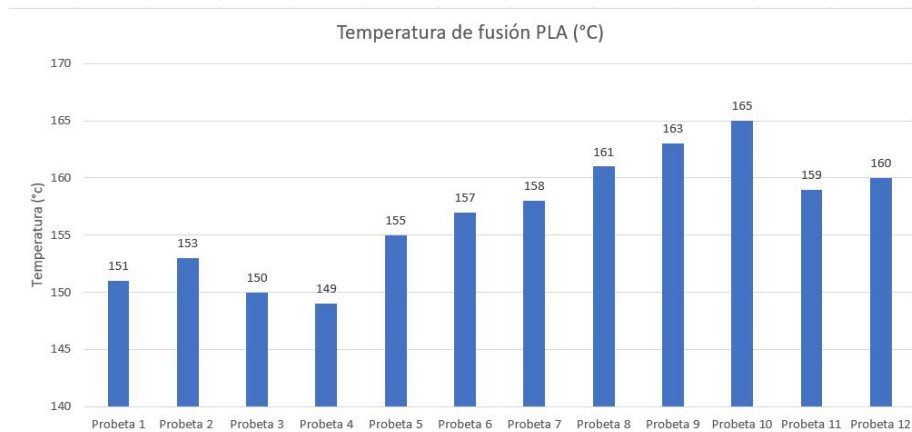


Figura 63: Temperatura de fusión del PLA

A continuación, se presenta la interpretación de los datos obtenidos anteriormente, así como la explicación de las curvas de esfuerzo-deformación para cada ensayo, las propiedades más relevantes al realizar los estudios con el material PLA para cada ensayo, además de mencionar las posibles fuentes de error al hacer las mediciones de datos brindados por la máquina de ensayos y si se tuvieron que realizar cambios significativos a la geometría de las probetas para poder realizar los ensayos.

7.1. Análisis de datos del ensayo de tracción

El ensayo de tracción se hizo según la norma ISO 527 la cual estipula geometrías que deben cumplirse en las probetas al realizar este ensayo. Fue utilizada la probeta tipo 1B con geometría como se puede observar en la Figura 28, luego de determinar la geometría se imprimieron en 3D las probetas de PLA con los parámetros modificados, se obtuvieron 45 probetas para el ensayo de tracción.

La obtención de datos en este ensayo fue realizado de forma manual, tanto como la fuerza que era desplegada en la máquina de ensayos y el alargamiento desplegado por un sensor de proximidad colocado arbitrariamente en el marco de la máquina de ensayos esto puede percutir en la exactitud de la recolección de datos. Otra posible fuente de error es la resolución de los instrumentos de medición, ya que la máquina de ensayos mide en su unidad más pequeña 0.5 libras y la resolución del sensor de proximidad es de 1 milímetro. La velocidad del ensayo fue de 1 mm/min esto para todas las pruebas de tracción.

Para obtener las propiedades mecánicas del PLA sometido a tracción es necesaria una curva esfuerzo-deformación, dichas curvas fueron realizadas con valores medios de alargamiento y fuerzas medidas con estos valores y se pudo determinar esfuerzo y deformaciones

que sufrieron las probetas durante el ensayo. Se obtuvieron un total de nueve curvas y en cada una de ellas tres gráficas que compraran los diferentes tipos de relleno y fueron divididos según el porcentaje de relleno utilizado para la creación de las probetas. Los datos extraídos de las curvas fueron el punto de fluencia, el módulo elástico y la resistencia a la tracción.

En la Figura 24 se puede observar una curva típica de esfuerzo-deformación, aunque en nuestro caso no tiene dicha forma debido a las fuentes de error anteriormente mencionadas. El punto de fluencia divide la curva esfuerzo-deformación entre la parte elástica y parte plástica; entre las probetas con el 30 % de infill no se apreció un cambio en cuanto a este punto, los tres patrones mostraron un valor de 4.440 MPa. Entre las probetas con el 60 % de infill se pudo apreciar un ligero cambio en el patrón concéntrico que tuvo un punto de fluencia de 8.900 MPa y entre las probetas con el 99 % de infill tuvo un punto de fluencia de 6.672 MPa, entre mayor sea el punto de fluencia esto quiere decir que el material soportará más deformación antes de sufrir deformaciones permanentes, aunque no necesariamente un material con mayor fluencia será más resistente a cargas de tracción.

Ahora se expone el valor de módulo elástico obtenido en los ensayos de tracción, esta propiedad es la razón de cambio entre deformación y esfuerzo, y solamente aplica en la zona de proporcionalidad, es decir, en la zona en donde se observa una recta en la curva esfuerzo-deformación. En las probetas de 30 % de infill el que tiene mayor módulo elástico es el patrón triangular con 282.461 MPa, en las probetas con el 60 % de infill la presenta el patrón concéntrico con 564.921 MPa y en las probetas con el 99 % de infill el mayor los presentan el patrón concéntrico con 564.921 MPa, entre mayor sea el valor del módulo elástico quiere decir que un material es más rígido, esto significa un material más frágil, aunque estemos hablando del mismo material se debe considerar que la estructura interna de las probetas sí está variando.

Por último, se observan los valores obtenidos de la resistencia a la tracción de las probetas de PLA, dicha propiedad es el esfuerzo máximo de tracción que soporta un material antes de romperse, así que será este el criterio que se tome para determinar qué parámetros optimizan una pieza fabricada de PLA que será puesta a esfuerzos de tracción. Para los valores de 30 % de infill se obtuvo que el patrón más resistente es el concéntrico con un valor de 26.690 MPa, los valores de 60 % de infill los patrones triangular y concéntrico obtuvieron el mismo valor con 24.470 MPa y con el 99 % infill los patrones lineal y concéntrico fueron los más resistentes a la tracción con valor de 28.910 MPa.

7.2. Análisis de datos del ensayo de compresión

El ensayo de compresión se utilizó la norma ASTM D695 la cuál determina la geometría que debe cumplirse en las probetas para la realización de este ensayo, en este caso se utilizaron probetas cilíndricas con una pulgada de ancho y dos pulgadas de alto, al mantener esta relación se asegura que la probeta trabajará a compresión y no tendrá pandeo al aplicarle la fuerza, la geometría utilizada se puede observar en la Figura 30, luego de definirse la geometría se procedió a imprimirse 45 probetas en 3D, en las cuales se modificaron los patrones de relleno y el porcentaje del relleno.

La obtención de datos se hizo de forma manual, las posibles fuentes de error son las

mismas que en el ensayo de tracción. La velocidad del ensayo fue de 1 mm/min para todas las pruebas de flexión. Para obtener las propiedades mecánicas del PLA sometido a fuerzas de compresión es necesario hacer curvas esfuerzo-deformación, dichas curvas fueron obtenidas con valores medios de alargamiento, al ser un ensayo de compresión este alargamiento tiene dirección contraria a la de tracción, por conveniencia se tomó como la misma dirección como positiva, para esto se tuvo que modificar la posición del sensor que mide dicho alargamiento. Se obtuvieron nueve curvas, que se organizaron en tres gráficas distintas que se dividen en los tres porcentajes de relleno y en ellas se compraron los diferentes tipos de relleno. Los datos extraídos de las curvas fueron el punto de fluencia, el módulo elástico y resistencia a la compresión.

El valor máximo del punto de fluencia obtenido en los ensayos de compresión en las probetas con el 30 % de infill fue el obtenido del patrón concéntrico que es de 3.511 MPa, en las probetas de 60 % de infill los tres patrones se comportaron de la misma forma con un valor de 1.756 MPa, en las probetas del 99 % de infill también se comportaron de la misma forma con un valor de 1.756 MPa, esto deja en evidencia que sin importar el patrón utilizado para la prueba de compresión, el punto de fluencia al aplicarse fuerzas de compresión se comporta de la misma manera al menos en cuanto mayor sea el porcentaje de relleno utilizado.

Para el módulo elástico se obtuvieron que las probetas con 30 % de infill el patrón concéntrico obtuvo un valor de 127.415 MPa, las probetas con el 60 % de infill el patrón triangular obtuvo un valor máximo de 222.977MPa y de igual forma para las probetas con el 99 % de infill el patrón triangular obtuvo un valor máximo de 111.488 MPa. Cabe reconocer que el módulo elástico es un indicador que la rigidez del material no necesariamente un valor alto es mejor, dependerá de la aplicación que se le dará el material, se hace énfasis en el valor máximo debido a que remarca la fragilidad del material. Si se requiere un material más dúctil se debería escoger el patrón que obtenga el módulo elástico menor.

Por último, se presenta el valor de la resistencia a la compresión de las probetas de PLA, como se mencionó anteriormente es este dato da la el esfuerzo máximo de compresión que soporta el material antes de romperse. Las probetas con 30 % de infill el patrón triangular presentó un valor de 35.114 MPa, las probetas con el 60 % de infill el patrón concéntrico presentó un valor de 35.114 MPa y las probetas con el 99 % de infill fue el patrón lineal que presentó un valor máximo de 45.649 MPa. Este es el criterio para determinar qué patrón de relleno y porcentaje de relleno optimizan piezas que serán destinadas a esfuerzos de compresión.

7.3. Análisis de datos del ensayo de corte

Para la realización del ensayo de corte se quiso hacer según la norma ASTM D732, pero no se pudo seguir al pie de la letra la norma ya que no se contaban con el instrumento para realizar dicha prueba, sin embargo se realizó un ensayo en cual el principio es el mismo que consiste en colocar un perno del material a ensayar entre platinas y aplicarle fuerza de compresión hasta que el material sufra corte perpendicular a su eje axial, por lo que la geometría que se utilizó para la realización de probetas fue la antes propuesta en la Figura 31. Luego, se procedió a realizar 45 probetas impresas en 3D variando los parámetros: patrón de relleno y porcentaje de relleno. Además, la obtención de datos también se hizo de forma

manual y bajo las mismas condiciones que los ensayos anteriormente mencionados.

La propiedad mecánica que se pudo obtener de este ensayo fue la resistencia al corte del material PLA al aplicarle fuerza a las platinas hasta que se hace presente el corte en la pieza, la velocidad del ensayo fue de 1 mm/min. Para las probetas con 30 % de infill el patrón concéntrico obtuvo un valor de 16.488 MPa, para las probetas con 60 % de infill el patrón triangular obtuvo un valor de 22.125 MPa y las probetas con 99 % de infill el patrón concéntrico obtuvo un valor de 27.576 MPa.

7.4. Análisis de datos del ensayo de flexión

El ensayo de flexión se hizo según la norma ISO 178 la cual da recomendaciones para la geometría de la probeta que será sometida al ensayo, la que se usó fue la que se muestra en la Figura 28. Luego de que se determinó la geometría se procedió a la impresión en 3D de las 45 probetas, en donde se modificaron los parámetros: patrón de relleno y porcentaje de relleno.

Como en los ensayos anteriores la obtención de datos se hizo de forma manual, y con los mismos instrumentos de medición, además se le hizo una modificación a la geometría original de la pieza, se hizo más larga para poder utilizar la máquina de ensayo debido a la posición de los soportes, se hizo la prueba de flexión a tres puntos en donde la pieza queda ubicada entre los soportes y se aplica una fuerza puntual en el centro. El ensayo también se hizo a una velocidad de 1 mm/min. La máquina de ensayos brindó datos de fuerza y deflexión, y se procedió a realizar curvas de esfuerzo-deformación con valores medios de deflexiones.

Para la obtención de las propiedades mecánicas del PLA sometido a fuerzas de flexión se analizaron nueve curvas esfuerzo-deformación de los diferentes patrones de relleno, que fueron organizadas según el porcentaje de relleno utilizadas en las probetas. Las propiedades encontradas en las curvas fueron punto de fluencia, módulo elástico y resistencia a flexión.

El valor del punto de fluencia obtenido en los ensayos de flexión para las probetas con el 30 % de infill fue de 25.421 MPa en los tres patrones puestos a prueba, para las probetas de 60 % y 90 % se obtuvieron el mismo valor de 12.711 MPa, esto quiere decir que a menor porcentaje de relleno mayor será la zona elástica para el material sometido a esfuerzos de flexión, lo que significa que soportará más antes de sufrir deformaciones permanentes.

Para el módulo elástico para el ensayo de flexión se obtuvo para las probetas de 30 % de infill el patrón lineal obtuvo un valor máximo de 8786.202 MPa, las probetas de 60 % de infill el patrón triangular obtuvo un valor máximo de 7687.927 MPa y las probetas de 99 % de infill el patrón concéntrico obtuvo un valor máximo de 6150.342 MPa. Esto quiere decir que dependiendo de la estructura interna el material se va tornando más frágil, también se puede ver que la fragilidad del material va aumentando si se coloca menos porcentaje de relleno y se somete a esfuerzos de flexión.

Por último, se obtuvo la resistencia a flexión del material PLA, siendo este el criterio para la optimización para piezas destinadas a ser sometidos a esfuerzos de flexión. Para las probetas con 30 % de infill tanto como el patrón triangular y el concéntrico obtuvieron los mismos valores de 88.975 MPa, las probetas con 60 % de infill el patrón concéntrico obtuvo

un valor de 114.397 MPa y para las probetas de 99% de infill se obtuvo el patrón triangular con un valor de 114.397 MPa.

7.5. Análisis de datos de temperatura

Para la prueba térmica se sometieron probetas con la geometría de las probetas utilizadas para los ensayos de tracción, que fueron colocadas en un horno de convección convencional con el fin de conocer la temperatura de fusión del material PLA, la temperatura del horno fue subida de tal manera que las probetas se empezaron a deformar con respecto a su forma original y la temperatura se midió con la ayuda de un multímetro digital con medidor de temperatura obteniendo la temperatura de fusión media del material PLA fue de 156.750 °C, aunque se acostumbra a manejar un rango de temperaturas el cual corresponde a 159-165 °C que fueron los valores obtenidos con las probetas puestas a prueba.

En cuanto a la variación de los parámetros de impresión, en este caso no es necesario realizar dichos cambios debido a que la temperatura de fusión de un material es una propiedad física y se puede medir sin importar que este cambie su composición, en este caso los patrones de relleno o el porcentaje de los rellenos.

1. Para piezas de PLA impresas en 3D sometidas a esfuerzo de tracción se demostró que los patrones lineal y concéntrico con un 99 % de infill cuentan con la mayor resistencia a la tracción con un valor máximo de 28.9 MPa, mejorando su propiedad mecánica a esfuerzos de tracción en un 46.3 % con respecto al valor mínimo registrado siendo los patrones lineal con 60 % de infill y triangular con 99 % de infill los que registraron un valor de 15.6 MPa.
2. Para piezas de PLA impresas en 3D sometidas a esfuerzo de compresión se demostró que el patrón lineal con un 99 % de infill cuenta con la mayor resistencia a la compresión con un valor máximo de 45.6 MPa, mejorando su propiedad mecánica a esfuerzos de compresión en un 50.0 % con respecto al valor mínimo registrado siendo el patrón triangular con un 60 % de infill con un valor de 22.8 MPa.
3. Para piezas de PLA impresas en 3D sometidas a esfuerzo de corte se demostró que el patrón concéntrico con un 99 % de infill cuenta con la mayor resistencia al corte con un valor máximo de 27.6 MPa, mejorando su propiedad mecánica a esfuerzos de corte en un 47.8 % con respecto al valor mínimo registrado que fue el patrón triangular con un 30 % de infill que obtuvo 14.4 MPa.
4. Para piezas de PLA impresas en 3D sometidas a esfuerzos de flexión se demostró que los patrones concéntrico al 60 % de infill y triangular al 99 % de infill cuentan con la mayor resistencia a la flexión con un valor máximo de 114.4 MPa, mejorando su propiedad mecánica a esfuerzos de flexión en un 33.3 % con respecto a los valor mínimo registrado que fueron los patrones triangular y lineal con un 60 % y el patrón lineal con un 30 % que obtuvieron un valor de 76.3 MPa.
5. Se corroboró que la temperatura de fusión del PLA estuviese dentro del rango de valores típicos brindados que es de 150-160°C, se obtuvo un rango de temperaturas entre 159-165°C con las probetas puestas a prueba y un valor medio de temperatura de 156.7°C.
6. Los resultados obtenidos en los cuadros de propiedades mecánicas de los ensayos realizados con diferentes tipos de patrones y diferentes porcentajes de infill no deben ser

descartados ya que cada configuración presenta una característica mecánica propia y debe quedar a discreción del diseñador cuál seleccionar a su conveniencia.

Recomendaciones

1. Se recomienda al usuario interesado en la impresión 3D controlar los parámetros previos a la impresión como: temperatura del extrusor, velocidad de desplazamiento del extrusor y cantidad de material existente en la impresora 3D para evitar la degradación del material, distribución inadecuada del material y evitar parar la impresión para colocar más material.
2. Se recomienda realizar una inspección visual de las probetas antes de realizar los ensayos, con la finalidad de descartar aquellas que no cumplan con las medidas exactas requeridas, evitar dejar rebaba en las piezas ya que modifican su geometría y la medición de esfuerzos aplicados a las piezas.
3. Se recomienda trabajar con más patrones de relleno ya que el software Ultimaker Cura ofrece una variedad más amplia de patrones que pueden mejorar las propiedades mecánicas del material PLA.
4. Se recomienda realizar la caracterización de los materiales acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y poliuretano termoplástico (TPU) que son materiales frecuentemente utilizados en el laboratorio "D-hive" por los usuarios.
5. Se recomienda la utilización de instrumentos de medición que presenten una mejor resolución para la obtención de datos más exactos y así evitar errores en la recolección de los mismos.

-
-
- [1] B. I. y. Pilar, *Diseño y reflexión: El cambio del diseño y el diseño del cambio*, es. Prensas de la Universidad de Zaragoza, oct. de 2018, Google-Books-ID: MH51DwAAQBAJ, ISBN: 978-84-17358-72-3.
 - [2] S. Leal, *E-Renovarse o morir: 7 Tendencias tecnológicas para convertirte en un líder digital*, es. LID Editorial, nov. de 2015, Google-Books-ID: bcPnCcGAAQBAJ, ISBN: 978-84-8356-270-3.
 - [3] M. Ojeda, *Impresión 3D | Tecnología de los Plásticos*, feb. de 2013. dirección: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html> (visitado 07-02-2019).
 - [4] *Introducción a la impresión 3D*. dirección: <https://www.sculpteo.com/es/impresion-3d/introduccion-la-impresion-3d/> (visitado 07-02-2019).
 - [5] D. Vargas, *Procesos de manufactura: de lo Tradicional a la Impresión en 3D*, Engineering. dirección: https://www.slideshare.net/Intelligy_slide/procesos-de-manufactura-de-lo-tradicional-a-la-impresion-en-3d (visitado 07-02-2019).
 - [6] S. González, *Impresión 3D*. Marcombo, 2016, ISBN: 978-84-267-2353-6. dirección: <https://books.google.com.gt/books?id=VezkDAEACAAJ>.
 - [7] S. Crawford, *How 3-D Printing Works*, en, mar. de 2011. dirección: <https://computer.howstuffworks.com/3-d-printing.htm> (visitado 07-02-2019).
 - [8] *Ultimaker Cura: Advanced 3D printing software, made accessible | Ultimaker*. dirección: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software> (visitado 07-02-2019).
 - [9] H. Lipson y M. Kurman, *Fabricated: The New World of 3D Printing*, en. Wiley, ene. de 2013, Google-Books-ID: IuOGAQP0CD8C, ISBN: 978-1-118-41024-0.
 - [10] A. Locker, *9 tipos de impresoras 3D - Guía de tecnologías de impresión 3D*, es. dirección: <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/> (visitado 08-02-2019).

- [11] p. R. Perez, *Las 4 tecnologías de impresión 3D más populares del mercado*, es-ES, ago. de 2015. dirección: <http://tecnoimpre3d.com/tecnologia/4-tecnologias/> (visitado 08-02-2019).
- [12] M. Tyson, *Starters guide to 3D Printing: Orientation*, en-AU. dirección: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/News/Australia/starters-guide-to-3d-printing-orientation> (visitado 05-03-2019).
- [13] L. Serna, F. Albán y col., “Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones”, *Ingeniería y competitividad*, vol. 5, n.º 1, págs. 16-26, 2011.
- [14] T. Koslow, *Filament Guide – All You Need to Know*, en, ene. de 2019. dirección: <https://all3dp.com/1/pla-filament-3d-printing/> (visitado 07-03-2019).
- [15] M. Ojeda, *Poliácido láctico (PLA) | Tecnología de los Plásticos*, ago. de 2011. dirección: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html> (visitado 07-03-2019).
- [16] S. Rohringer, *PLA vs ABS: comparación de filamentos para impresión 3D*, es. dirección: <https://all3dp.com/es/filamento-abs-filamento-pla-comparacion-impresion-3d/> (visitado 08-03-2019).
- [17] C. Núñez, A. Roca y J. Jorba, *Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen II. Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos*. Edicions Universitat Barcelona, 2013, vol. 2.
- [18] F. Beer, R. Johnston, J. DeWolf y D. Mazurek, *Mecánica de materiales (6a. ed.)* McGraw Hill Mexico, 2013, ISBN: 978-1-4562-4516-0. dirección: <https://books.google.com.gt/books?id=XhJRDAAAQBAJ>.
- [19] M. Ordoñez, “Ensayo de Esfuerzo Cortante”, en, dirección: https://www.academia.edu/14556659/Ensayo_de_Esfuerzo_Cortante (visitado 12-03-2019).
- [20] A. Ávila, “Métodos de Caracterización de Polímeros”, es, pág. 29, 2013.
- [21] ISO, *Plastics: Determination of tensile properties - Part 2*, ISO 527-2:2012. 2012.
- [22] —, *Plastics: Determination of flexural properties - Part 2*, ISO 178:2010. 2010.
- [23] ASTM, *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*, ASTM D695. 2015.
- [24] —, *Standard Test Method for Shear Strength of Plastics*, ASTM D732. 2017.

11.1. Probetas impresas en 3D



Figura 64: Probetas de tracción
Se puede observar una muestra de las probetas para el ensayo de tracción.



Figura 65: Probetas de compresión

Se puede observar una muestra de las probetas para el ensayo de compresión.



Figura 66: Probetas de corte

Se puede observar una muestra de las probetas para el ensayo de corte.

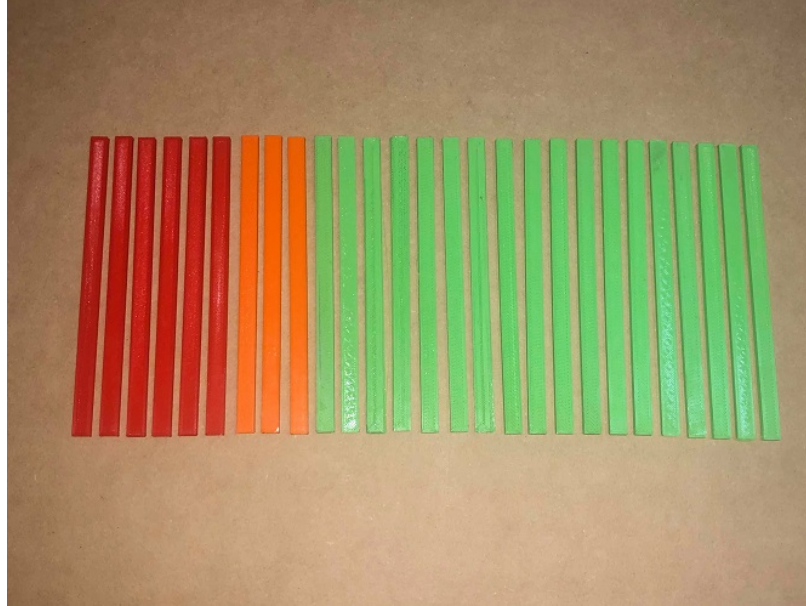


Figura 67: Probetas de flexión

Se puede observar una muestra de las probetas para el ensayo de flexión.

11.2. Probetas luego de los ensayos



Figura 68: Probetas de tracción ensayadas

Se puede observar una muestra de las probetas luego de ser sometidas al ensayo de tracción.



Figura 69: Probetas de compresión ensayadas

Se puede observar una muestra de las probetas luego de ser sometidas al ensayo de compresión.



Figura 70: Probetas de corte ensayadas

Se puede observar una muestra de las probetas luego de ser sometidas al ensayo de corte.



Figura 71: Probetas de flexión ensayadas
Se puede observar una muestra de las probetas luego de ser sometidas al ensayo de flexión.



Figura 72: Probetas de prueba térmica
Se puede observar una muestra de las probetas luego de ser sometidas a la prueba térmica.

11.3. Vídeos de ensayos mecánicos

- Ensayo de corte: <https://www.youtube.com/watch?v=aKL51JBskOM>
- Ensayo de flexión: <https://www.youtube.com/watch?v=S3dtEx3pJgQ>
- Ensayo de compresión: <https://www.youtube.com/watch?v=NWu5wLV1w7w>
- Ensayo de tracción: <https://www.youtube.com/watch?v=rGtyfrEaoao>

