



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA:

**“PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA RESINA PARA
ESTEREOLITOGRAFÍA CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE
IMPRESIÓN”**

AUTOR: María Fernanda Boada Paredes.

DIRECTOR: Ing. Cosme Damián Mejía Echeverría, MSc

Ibarra – Ecuador, 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD	100350354-5		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Boada Paredes María Fernanda		
DIRECCIÓN:	Cotacachi – El Ejido		
EMAIL:	mfboadap@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062914126	TELÉFONO MÓVIL:	0986080882

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“Propiedades mecánicas de la resina con diferentes configuraciones de impresión”
AUTOR:	Boada Paredes María Fernanda
FECHA:	11/12/20 20
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA	Ingeniería Mecatrónica
DIRECTOR:	Ing. Cosme Mejía, MSc

2. CONSTANCIA

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

Ibarra, a los 11 días del mes de diciembre de 2020

EL AUTOR:

.....
María Fernanda Boada Paredes



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico, que el proyecto de titulación denominado “Propiedades mecánicas de la resina para estereolitografía con diferentes configuraciones de impresión” fue desarrollado por María Fernanda Boada Paredes, bajo mi supervisión para la obtención del título de Ingeniería Mecatrónica.

.....
MSc. Cosme Damián Mejía

DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi amada hija, Fernanda Estefanía quien es el motor de mi vida, mi motivación y mi fortaleza cada día, con amor...

Fernanda Boada

AGRADECIMIENTOS

Gracias a toda la familia CIME con quienes he compartido todos estos años de formación, personal administrativo, profesores quienes compartieron sus conocimientos.

A mi familia

Por ser en mi vida un pilar fundamental, quienes me han apoyado para verme así cumplir una de mis metas.

A mi abuelita, Matilde

Quien ha sido mi ejemplo de superación, a quien admiro, una mujer trabajadora, bondadosa gracias por todo el cariño y apoyo que ha sabido brindarme.

A mi tutor, Ing Cosme

Gracias por su apoyo incondicional desde que inició su ardua tarea de ser mi tutor, por compartir sus conocimientos, por su paciencia y por haber hecho posible que esta etapa de investigación forme parte también de los gratos momentos de mi carrera estudiantil.

A Marco Jaramillo, por ser mi amigo y mi faro durante este tiempo, gracias por su motivación, exigencias y palabras de aliento.

A mis amigos, Alex, Jefferson, Xavier, Danilo, Pedro son de los regalos más bonitos que me llevo de mi carrera universitaria, gracias por su amistad y por los momentos especiales compartidos.

A mi nena, Estefanía

Por ser una niña valiente, gracias por tu comprensión, dedicación y esfuerzo durante este periodo.

RESUMEN

La impresión 3D cada día logra un mayor posicionamiento en procesos de manufactura, debido a esto existen varias alternativas tanto en materiales de impresión como en la técnica usada para imprimir el sólido. Todas estas alternativas son muy versátiles y pueden ser aplicadas acorde a las necesidades a satisfacerse. De momento las impresoras 3D por estereolitografía, tienen uno de los mejores acabados superficiales existentes, debido a que utiliza luz UV para solidificar una fina capa de resina que se creará una a continuación de otra para formar el sólido deseado. Además, los principales parámetros que se pueden variar en este tipo de impresoras son el espesor por capa, tiempos de curado de la capa y la orientación de la pieza.

En el presente trabajo, se realizan 9 grupos de probetas con diferente configuración de parámetros de impresión, a las cuales se les someterá a ensayos destructivos y determinar que parámetros de impresión son los adecuados para alcanzar las mejores propiedades mecánicas de las piezas. Aplicando la normativa ASTM 638 se crean los especímenes de prueba y se inician lineamientos para realizar los ensayos destructivos en la máquina James Heal Titan,

A partir de las curvas obtenidas se identifica al material como elasto frágil lineal. Se identifica que se obtiene mejores propiedades mecánicas en la impresión con capas perpendiculares a la dirección de aplicación de la fuerza, con tiempos superiores a los 10 segundos de curado y capas superiores a los 100 μm ; con una técnica de impresión de exposición de la capa completa a los rayos UV (DLP-SLA).

Palabras clave: estereolitografía, espesor por capa, tiempo de curado, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

Nowadays 3D printing achieves a higher positioning in manufacturing processes, that is why there are several alternatives both in printing materials and in the technique used to print solid pieces.

All these alternatives are very versatile and can be applied according to the needs to be satisfied. Currently stereolithography 3D printers have one of the best existing surface finishes, because it uses UV light to solidify a thin layer of resin that is created one after the other to form the desired solid. In addition, the main parameters that can be varied in this type of printer are the thickness per layer, the curing times of the layer and the orientation of the part.

In this work, 9 groups of test tubes are made with different configuration of printing parameters, which will be subjected to destructive tests and determine which printing parameters are adequate to achieve the best mechanical properties of the pieces. Applying the ASTM 638 standard, test specimens are created and guidelines are initiated to perform destructive tests on the James Heal Titan machine.

From the curves obtained, the material is identified as linear elastofragile. It has identified that better mechanical properties have been obtained in printing with perpendicular layers towards the application of the force, with curing times greater than 10 seconds and layers greater than 100 μm ; with a printing technique of full layer exposure to UV rays (DLP-SLA).

Keywords: stereolithography, thickness per layer, curing time, mechanical properties.

Tabla de Contenidos

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	ii
CERTIFICACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT.....	vii
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema.....	1
Objetivos	1
Objetivo General.....	1
Objetivos Específicos.....	1
Justificación	2
Alcance	3
CAPÍTULO 1	3
1. Marco Referencial.....	4
1.1. Estereolitografía.....	4
1.1.1. Principio de funcionamiento	4

1.1.2.	Clasificación de los procesos	4
1.1.3.	Enfoques de la superficie libre y restringida.....	5
1.1.4.	Estereolitografía láser.....	7
1.1.5.	Estereolitografía del procesamiento digital de la luz (DLP)	7
1.1.6.	Características de la impresora.....	9
1.2.	Fotoresinas	10
1.2.1.	Componentes de la resina.....	11
1.2.2.	Ejemplos de fotoresinas	12
1.2.3.	Isotropía y anisotropía.....	13
1.2.4.	Aplicaciones	14
1.3.	Norma ASTM	15
1.3.1.	Especímenes de prueba	16
1.3.2.	Velocidad de testeo	16
1.4.	Máquina de Ensayo.....	17
1.4.1.	James Heal Titan 10	17
1.4.2.	Sistema de ensayos bicolonna 5969.....	17
CAPÍTULO 2.....		19
2.	Metodología.....	19

2.1.	Diagrama de proceso.....	19
2.2.	Fabricación de las probetas.....	19
2.2.1.	Diseño de probetas	19
2.2.2.	Proceso de impresión	21
2.2.3.	Tiempos de curado y espesor por capa.....	25
2.2.4.	Proceso de impresión	27
CAPÍTULO 3.....		31
3.	Pruebas y resultados.....	31
3.1.	Ensayos Destructivos	31
3.2.	Desarrollo de curvas	33
3.3.	Esfuerzos.....	34
3.3.1.	Esfuerzo obtenido con variación de tiempo de curado	34
3.3.2.	Esfuerzo con variación de espesor de capa.	35
3.3.3.	Deformación con variación de tiempo de curado.....	36
3.3.4.	Deformación con variación de espesor de capa.	37
3.3.5.	Módulo de elasticidad	37
3.4.	Resultados generales por cada configuración	39
3.5.	Propuesta de Parámetros	40

CAPÍTULO 4.....	41
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	41
4.1. Conclusiones.....	41
4.2. Recomendaciones.....	41
Lista de referencias.....	43

Lista de tablas

Tabla: 1-1 Características de impresora DLP [4,15].	10
Tabla: 1-2 Marcas de fabricantes de resina relevantes en el mercado [17,18,19].	12
Tabla: 1-3 Designación de Velocidad de pruebas [21].....	16
Tabla: 1-4 Ponderación para las máquinas de ensayos [22,23]	18
Tabla: 2-1 Dimensiones de la probeta tipo V [21].....	20
Tabla: 2-2 Configuraciones "tiempos de curado y espesor por capa" impresión horizontal ...	25
Tabla: 2-3 Configuraciones "tiempos de curado y espesor por capa" impresión lateral	26
Tabla: 2-4 Configuraciones "tiempos de curado y espesor por capa" impresión vertical	27
Tabla: 3-1 Resultados generales	39

Lista de figuras

Fig. 1-1 Clasificación SLA [10].....	5
Fig. 1-2 Clasificación SLA [10].....	7
Fig. 1-3 Clasificación SLA [10].....	8
Fig. 1-4 Componentes de la resina [10]	10
Fig. 1-5 Vista microscópica de impresión 3D mediante FDM [20]	13
Fig. 1-6 Vista microscópica de una impresión 3D en SLA [20].....	14
Fig. 2-1 Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto	19
Fig. 2-2 Probeta tipo V acotada [21].....	19
Fig. 2-3 Orientación: a) vertical, b) horizontal c) lateral.	20
Fig. 2-4 Probetas impresas con una mala resolución.....	21
Fig. 2-5 Reubicación del proyector con la nueva base	22
Fig. 2-6 Programa nano DLP	22
Fig. 2-7 Fugas de la cuba	23
Fig. 2-8 Perforación de agujeros en la plataforma.....	23
Fig. 2-9 Cintas seleccionadas para impresión.....	24
Fig. 2-10 Interfaz de la impresora 3D [4]	28
Fig. 2-11 Parámetros de espesor por capa y tiempo de curado.....	28

Fig. 2-12 Tornillos de soporte de la plataforma.....	29
Fig. 2-13 Estado de la impresión.	30
Fig. 2-14 Lijado de Probetas.....	30
Fig. 3-1 Configuración de parámetros a ejecutarse en el ensayo.....	31
Fig. 3-2 Probetas previo a someterse a ensayos destructivos	32
Fig. 3-3 Sujeción de mordazas y alineamiento de probeta	32
Fig. 3-4 Probetas desechadas	33
Fig. 3-5 Gráfica de esfuerzo máximo con variaciones en el tiempo de curado	35
Fig. 3-6 Gráfica de esfuerzo máximo con variaciones en el espesor de capa.....	35
Fig. 3-7 Gráfica de deformación con variación de tiempo de curado.....	36
Fig. 3-8 Gráfica de deformación con variación de espesor de capa	37
Fig. 3-9 Gráfica de Módulo de elasticidad con variación de tiempo de curado	38
Fig. 3-10 Gráfica de Módulo de elasticidad con variación de espesor por capa.	38

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

En el mercado de impresoras 3D, existen varias del tipo de impresión por Estereolitografía; además cada fabricante ofrece algunos tipos de resinas, los fabricantes de impresoras suelen ser muy generales al momento de dar a conocer la guía de impresión como por ejemplo Kudo3D en su manual informa de manera muy básica el proceso de impresión, por lo que el usuario en muchos casos debe realizar el método de prueba y error para tener la mejor impresión posible; además en las resinas que ofrecen especifican las características mecánicas pero informan que las propiedades del material pueden variar con la geometría del objeto, la configuración y orientación de impresión y el procedimiento de operación como es el caso de las resinas elaboradas por Kudo3D [1, 2, 3].

Actualmente en el laboratorio de manufactura de la UTN cuenta con una impresora de este tipo, pero no existe un análisis ni los parámetros adecuados de impresión para obtener piezas con la resistencia mecánica que indica el fabricante de la resina [4].

Por tal motivo se plantea obtener experimentalmente los parámetros adecuados para obtener una impresión por estereolitografía con las mejores cualidades mecánicas posibles.

Objetivos

Objetivo General

- Determinar los parámetros de impresión por estereolitografía, para alcanzar las mejores propiedades mecánicas de las piezas impresas

Objetivos Específicos

- Establecer los tiempos de curado y espesores de capa para la impresión de probetas según la norma ASTM.
- Determinar la influencia del tiempo de curado de la foto resina, sobre las características mecánicas de la impresión.
- Determinar la influencia del espesor por capa de la impresión 3D en la resistencia mecánica.
- Proponer los parámetros de impresión en estereolitografía para obtener piezas con las mejores características mecánicas

Justificación

En la actualidad la impresión 3D está cambiando el proceso de fabricación de elementos mecánicos por la rapidez de la elaboración de un prototipo físico a medida, por este motivo es que una investigación sobre los mejores parámetros de impresión 3D por estereolitografía contribuirá al desarrollo de este tipo de tecnología [5].

El objetivo del prototipado es identificar los puntos más débiles a una etapa temprana del diseño para aumentar la calidad del producto final y así aumentar los beneficios para la industria es por este motivo que tener un componente con las características mecánicas similares a las del producto final ayuda a encontrar de forma más precisa la parte más susceptible a un fallo mecánico; además reducir la cantidad de material utilizado en las partes con un excesivo factor de seguridad y economizar costos en la fabricación en masa ofreciendo un producto confiable y de buena calidad [6].

Dentro de las etapas de la creación de un producto, el prototipado es una faceta crucial, en la cual el diseñador puede obtener distintas repuestas concretas del diseño como, por ejemplo, si los métodos de fabricación y los materiales que está utilizando en los diferentes componentes del producto son los adecuados. Debido a que el prototipo es manufacturado con métodos de fabricación distinto al producto fabricado en masa, por ejemplo dentro de la fabricación de componentes plásticos el prototipo

puede ser realizado mediante la impresión 3D pero al momento de fabricarlo en masa la opción más factible es el método de inyección de plástico en moldes, es necesario que el prototipo cuente con una buena fidelidad con el producto final; por esta razón dentro del diseño se requiere una distribución adecuada entre la fidelidad, el tiempo, esfuerzo y el costo requerido para la fabricación del prototipo, dentro de la industria se maneja prototipos que se puedan construir de manera rápida y económica pero aun así tengan una gran fidelidad para proporcionar al diseñador la información que está buscando [7].

En el mercado actual existen muchas clases de fotoreinas algunas que son elásticas, rígidas, flexibles, resistentes a altas temperaturas entre otras [8], en las que se puede aplicar la siguiente investigación para proporcionar más fidelidad al prototipo final y dar al diseñador la información más cercana a la del producto final [9].

Alcance

Se construirán probetas para ensayos mecánicos bajo la norma ASTM en una impresora de estereolitografía con distintos parámetros de impresión basados en el tiempo de curado y el espesor de las capas.

Se realizará ensayos destructivos para la obtención de las propiedades mecánicas de las piezas impresas con diferente tiempo de curado y espesor de capa. Una vez obtenidos los resultados se analizarán para determinar los parámetros óptimos de impresión en los que se obtiene la mayor resistencia mecánica.

CAPÍTULO 1

1. Marco Referencial

1.1. Estereolitografía

La estereolitografía (SLA, por sus siglas en inglés) fue desarrollada por el Dr. Hideo Kodama en 1981 convirtiéndose en la tecnología de fabricación aditiva (AM) más antigua, se consideró como un método rápido y económico para reconstruir modelos en el espacio (3D) siendo alternativa a las técnicas holográficas [10].

Con el desarrollo de una variedad de procesos, el SLA ha ido mucho más allá de sus aplicaciones iniciales de modelado y creación de prototipos, ya que puede utilizarse para crear geometrías muy complejas y diseñadas individualmente y el material utilizado ya no se limita a los polímeros convencionales, con lo que es posible fabricar muestras compuestas e incluso metálicas o cerámicas. Sin embargo, actualmente el SLA solo es utilizado para estructurar un material a la vez, y en comparación con diferentes tecnologías de fabricación aditiva (AM), los procesos típicos de SLA tienen una mayor resolución y mejores cualidades superficiales, pero con tiempos de impresión más lentos y un mayor costo [10].

1.1.1. Principio de funcionamiento

El SLA es un método de polimerización, en el cual las capas del precursor líquido de una cuba (recipiente) se exponen secuencialmente a la luz ultravioleta (UV) solidificándose selectivamente gracias a una molécula fotoiniciadora (PI) presente en la resina, la cual responde a la luz entrante y al ser irradiada activa localmente la reacción de polimerización química, lo que conlleva a la curación sólo en el área expuesta. Tras desarrollarse la primera capa, se aplica una película de resina fresca, se irradia y se cura. En consecuencia, la pieza crece gradualmente capa tras capa [11].

1.1.2. Clasificación de los procesos

Los procesos de SLA se pueden clasificar según la dirección de la luz incidente o el método de irradiación, figura 1-1.

Según la dirección de la luz incidente, el SLA se puede aplicar de dos maneras

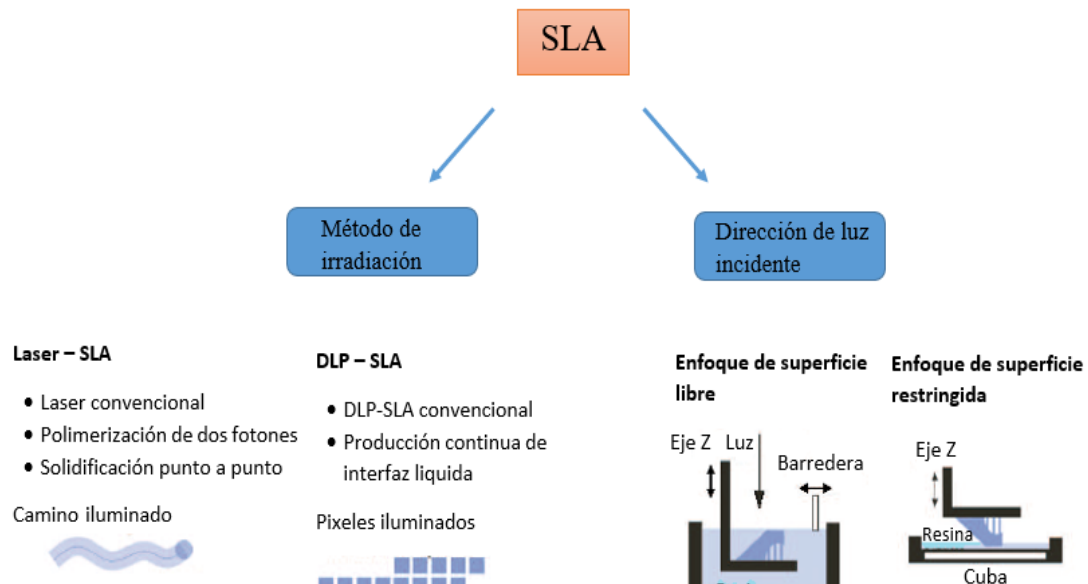


Fig. 1-1 Clasificación SLA [10].

distintas; ya sea desde la parte superior, conocida como el enfoque de superficie libre, o desde la parte inferior a través de una cuba transparente en el enfoque de superficie restringida [10].

La irradiación se efectúa por medio de un láser que escanea cada punto de la sección transversal (SLA-laser) o proyectando toda la imagen pixelada en la capa (DLP, procesamiento digital de luz). Un método menos común es la iluminación a través de una fotomáscara de pantalla de cristal líquido (LCD) [10].

1.1.3. Enfoques de la superficie libre y restringida

El SLA es un método de polimerización, en el cual, las capas del precursor líquido de una cuba (recipiente), se exponen secuencialmente a la luz ultravioleta (UV) solidificándose selectivamente gracias a una molécula fotoiniciadora (PI) presente en la resina, la cual, responde a la luz entrante y al ser irradiada activa localmente la reacción de polimerización química, lo que conlleva a la curación sólo en el área expuesta. Tras desarrollarse la primera capa, se aplica una película de resina fresca, se irradia y se cura. En consecuencia, la pieza crece gradualmente capa tras capa [12].

El enfoque de superficie restringida o de exposición al fondo, tiene una plataforma de construcción ésta se suspende sobre el baño de resina. La iluminación se realiza desde la parte inferior a través de una superficie transparente curando una capa de resina entre la plataforma de la parte impresa y la superficie de la resina. Esta capa se adhiere a la forma de la parte impresa al elevar el eje z una distancia definida. A medida que cada capa se cura, la plataforma con la parte adherida se eleva, y la pieza impresa crece suspendida de la plataforma hacia abajo [13].

Tanto como en el enfoque de superficie libre y restringida son necesarias estructuras de apoyo hechas del mismo material de impresión, en caso de salientes y socavones para asegurar una adhesión adecuada a la plataforma [12].

La superficie lisa, que se crea con una altura de capa estrechamente definida debido al movimiento preciso en el eje z con una precisión de hasta $0,1-1 \mu\text{m}$, es el principal beneficio en la configuración de la superficie restringida al no tener la necesidad de un barredor mecánico, además de que esta capa es creada más rápidamente que en el enfoque de superficie libre. Otra ventaja, es la menor cantidad resina que se necesita, debido a que la pieza impresa no tiene que estar completamente sumergida en la resina [12]. Por otro lado, una de las principales desventajas de la configuración del enfoque de superficie restringida es que las fuerzas de atracción entre la parte impresa y la superficie del recipiente deben ser logradas para cada capa. Al subir el eje z, la capa curada necesita adherirse a las capas de arriba, con lo que esta capa no lograría adherirse

a la superficie del recipiente. Para reducir este problema, se han incluido revestimientos hidrofóbicos en la bandeja de materiales y la modificación del mecanismo de separación mecánica o la aplicación de fuerzas de corte [12].

1.1.4. Estereolitografía láser

En SLA-laser, también conocido como SLA basado en vectores, o simplemente SLA, cada capa es curada por el escaneo de un láser UV en la película de resina. El movimiento x-y del láser es implementado por dos galvanómetros en combinación con un sistema óptico dedicado. En la figura 1-2 se muestra un ejemplo de configuración. Estos dispositivos convencionales de SLA pueden alcanzar una resolución de 5-10 μm , pero a un costo mayor que otras tecnologías de AM [14].

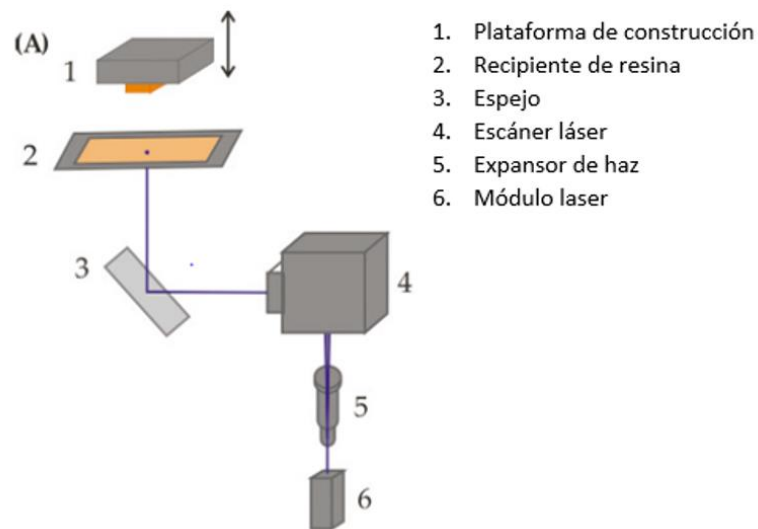


Fig. 1-2 Clasificación SLA [10].

Para lograr estas resoluciones, se considera la exactitud de la etapa z y la composición optimizada de la resina. Los métodos para mejorar aún más la resolución a las regiones submicrónicas incluyen la polimerización de dos fotones (TPP) y la solidificación puntual [10].

1.1.5. Estereolitografía del procesamiento digital de la luz (DLP)

El DLP es un método que alcanza resoluciones del orden de $25\ \mu\text{m}$ y más pequeños de $0,6\ \mu\text{m}$, además, se han impreso resinas rellenas de partículas cerámicas mediante DLP con alturas de capa de $15\ \mu\text{m}$ y con resoluciones laterales de $40\ \mu\text{m}$ [10].

A diferencia del láser-SLA, toda la sección transversal de una capa es iluminada simultáneamente por un motor de luz DLP, como se muestra en la figura 1-3 El dispositivo de micro espejos digitales (DMD) es el componente clave y funciona como una máscara dinámica para el proceso de DLP. Está construido de un conjunto de espejos, donde cada uno de estos representa un solo píxel y la inclinación individual de cada espejo permite un cambio rápido y fiable de los píxeles [10]

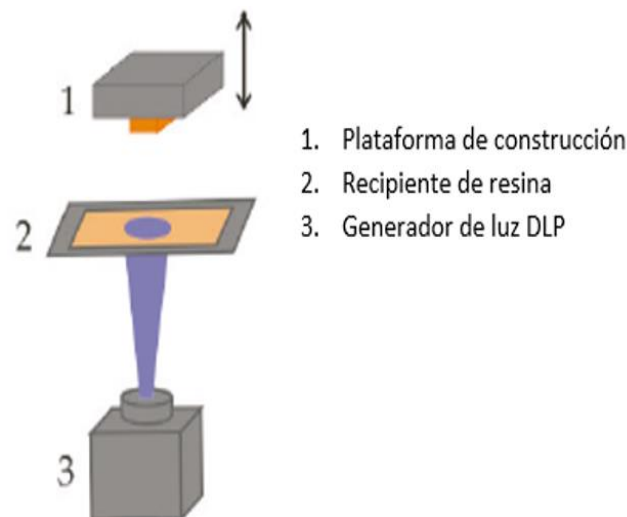


Fig. 1-3 Clasificación SLA [10].

Una fuente de luz (a menudo LED) y la óptica, pueden proyectar las secciones transversales de luz deseadas de manera rápida y precisa. Con su mecanismo de exposición basado en píxeles, el DLP es excelente para la iluminación de esquinas agudas, pero puede causar rugosidades en la superficie [10].

Por consiguiente, cuando se desea una mayor resolución es necesario reducir el tamaño del píxel con la ayuda de la óptica designada. El DMD tiene una cantidad fija de espejos, que permiten modificar los parámetros de la imagen, además, reduce el

tamaño máximo de la geometría. Aunque no alcanza las resoluciones submicrónicas del láser-SLA, pero conserva las ventajas de un menor costo y mayores velocidades de impresión [10].

- **Producción continua de interfaz líquida (CLIP)**

La producción continua de interfaz líquida (CLIP, por sus siglas en inglés) es un tipo de proceso de DLP de superficie restringida, en el que una fina película entre la plataforma de construcción y la bandeja de material no se cura y permanece líquida, conocida como zona muerta. La zona muerta puede generarse utilizando un recipiente con un suelo permeable al oxígeno mejorando la calidad de la superficie y aumentando la velocidad de impresión hasta 500 mm/h. Esta tecnología es comercializada por Carbon Inc, estableciéndose en el mercado de AM debido a sus reducidos tiempos de impresión[10].

1.1.6. Características de la impresora

En la Universidad Técnica del Norte se desarrolló un proyecto cuyo objetivo fue desarrollar una impresora 3D por estereolitografía para el laboratorio de simulación y mecanizado CNC; permite el desarrollo de prototipos para diferentes ramas de investigación biomecánicas, procesos de manufactura, ciencias de los materiales, etc [4]. A continuación, en la tabla 1-1 se detallan las principales características de la impresora a utilizarse en la presente investigación.

Tabla: 1-1

Características de impresora DLP [4,15].

Impresora 3D por estereolitografía UTN	
Características	
Método de impresión	DLP
Resolución SVGA	2800
Área de impresión	200 * 200 * 400(mm)
Precio aproximado	1346,00 (\$)

1.2. Fotoresinas

Es un tipo de polímero que al exponerse a la luz ultravioleta cambia sus propiedades físicas y mecánicas, formando una diferenciación física entre la parte expuesta y no expuesta. En este caso la fotoresina solo se solidifica en el área que recibe la luz mientras que el área que no la recibe permanece en estado líquido [16].

Los componentes de estas resinas se detallan en la figura 1-4. Además, la mayoría de las formulaciones de resina tienen tintes inertes, que absorben la luz incidente y mejoran el control de la polimerización.



Fig. 1-4 Componentes de la resina [10]

1.2.1. Componentes de la resina

- Precursores

Son moléculas líquidas que permiten la polimerización (es decir unirse entre sí) después de **haberse expuesto a la luz para formar** una red tridimensional sólida. Dependiendo de la aplicación futura y de los atributos deseados, se puede utilizar una variedad de monómeros, oligómeros o prepolímeros [10].

- Foto iniciadores

El PI es el componente de la resina que reacciona a la luz. Una vez irradiado a la longitud de onda correcta, se excita y puede iniciar la reacción de curación. Es necesario seleccionar un IP adecuado, dependiendo de la naturaleza del precursor utilizado, ya que el tipo y cantidad del mismo influye en las propiedades de las piezas [10].

- Absorbedores

El absorbente de luz es el que reduce la penetración de la luz en la resina y limita la profundidad hasta la que la resina se cura. Los absorbentes de rayos ultravioleta más utilizados son los derivados del benzotriazol [10].

- Aditivos

Los aditivos y estabilizadores reológicos aumentan la carga de sólidos y prolongan la vida útil de las piezas impresas con el método slurry, así como para la estabilidad durante trabajos de impresión más largos. Se debe evitar la aglomeración y sedimentación de partículas para garantizar una distribución continua y homogénea de polvo de cerámica o metal [10].

1.2.2. Ejemplos de fotoresinas

En el mercado existen diferentes tipos de resinas para impresión 3D de estereolitografía, donde cada una de estas resinas puede variar sus características mecánicas, ópticas y térmicas.

En el presente estudio se analizan tres tipos de resinas, según sus propiedades se selecciona la más adecuada para el desarrollo del proyecto. Entre los factores más importantes al seleccionar la resina es asegurarse que esta sea la adecuada para impresión en DLP, con una longitud de onda de 405nm para el fotocurado; a diferencia de la resina utilizada para SLA que usa una longitud de onda de 385nm [10].

Tabla: 1-2

Marcas de fabricantes de resina relevantes en el mercado [17,18,19].

Marcas de Resina	Resistencia a la Tracción (MPa)	Elongación (%)	Longitud de Onda (nm)
Hard Join 3D	15	4	No se especifica
AnyCubic	23,4	14,2	405
Kudo 3D	34,9	1,2	400-440

La resina Hard Join 3D es ideal para crear objetos sin capacidad de compresión bajo coacción, presenta cierta contracción, siendo esta de curado rápido. Los objetos no podrán doblarse ni ensancharse y se caracterizan por presentar altas propiedades de tracción, cizallamiento y poca elongación [17].

Ventajas de alta solidificación, velocidad con fuerte adhesión del modelo, fácil de desmontar después de la formación, rígida son parámetros importantes que oferta Anycubic siendo este un material estable bajo diferentes condiciones climáticas, además, es fácil de almacenar, superando las deficiencias de otras resinas que se humedecen fácilmente y la corrosión ambiental [18]

Alta resolución y una superficie lisa son las características de los fabricantes de resina Kudo 3D, adecuada para prototipos cuyos detalles solo identifican los equipos profesionales. 3DSR UHR es la mejor opción para cualquier área de investigación de impresión [19].

1.2.3. Isotropía y anisotropía

La anisotropía se define como las propiedades físicas que varían según la dirección, es decir, un objeto impreso en 3D puede tener diferentes alargamientos de ruptura o rigidez en las direcciones X, Y y Z. Esto se debe a que las impresoras FDM (Modelado por Deposición Fundida) funden capas de plástico sobre capas ya fundidas y solidificadas, creando una adhesión mecánica (no química) como se muestra en la figura 1-5. Por lo tanto, las partes impresas tendrán diferentes propiedades mecánicas dependiendo de la dirección en que la tensión mecánica las impacte siendo más fuerte en la dirección de la línea depositada y menos fuerte a lo largo de los ejes que se componen principalmente de estas regiones de enlace entre fibras. Esta es también la razón por la cual es difícil producir objetos impermeables, ya que las impresiones FDM contienen en agujeros microscópicos [20]. En la impresión 3D SLA no hay diferencia

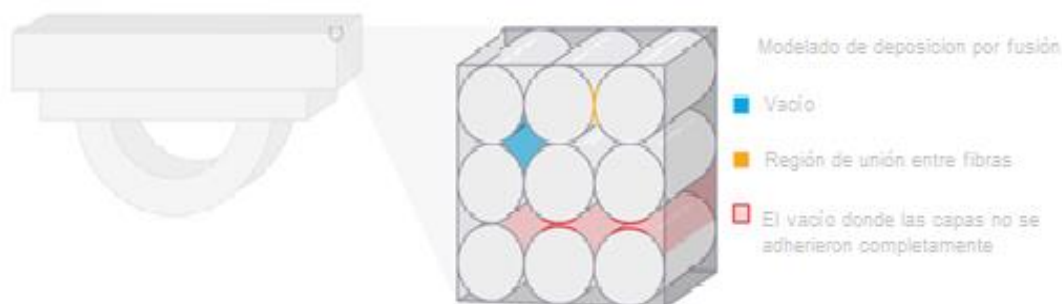


Fig. 1-5 Vista microscópica de impresión 3D mediante FDM [20]

Entre los enlaces químicos que forman las capas y las fuerzas que mantienen esas capas juntas (figura 2.6). A medida que se forma y se cura cada capa, la reacción de polimerización también incluirá a los grupos de la capa anterior, formando enlaces covalentes no solo lateralmente, sino también con la capa anterior. Esto significa que

hay poca diferencia entre el eje Z y el plano XY. Tampoco hay huecos o fisuras microscópicas, por lo que las impresiones son impermeables y completamente densas [20].

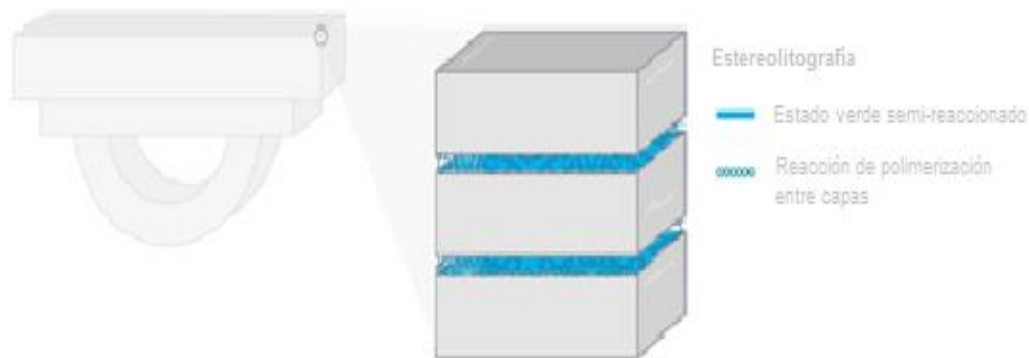


Fig. 1-6 Vista microscópica de una impresión 3D en SLA [20]

1.2.4. Aplicaciones

Las resinas usadas en estereolitografía generalmente son formuladas para aplicaciones o industria definidas, esto debido a que las máquinas presentan diferentes características y procesos. A continuación, se presenta las diferentes aplicaciones que se da a las resinas para estereolitografía [20].

- Estándar

Este tipo de resinas son ideales para la creación rápida de prototipos, desarrollo de productos y aplicaciones de modelado en general. Las resinas estándar ofrecen una alta resolución, acabado superficial uniforme y características finas [20].

- Ingeniería

Las resinas de ingeniería asemejan a una gama de plásticos modelados por inyección, permitiendo a los desarrolladores crear prototipos, piezas funcionales desde ensamblajes, moldes de inyección y fabricar productos finales. Presentan materiales con características resistentes a la temperatura, flexibles, y duraderos [20].

- **Dental**

Las aplicaciones en el campo de odontología incluyen modelos de ortodoncia (diagnóstico y educativo), partes biocompatibles (guías quirúrgicas y de perforación), etc. Estos materiales permiten que los laboratorios dentales logren crear productos dentales personalizados partiendo de tomografías computarizadas de haz cónico [20].

- **Joyería**

En el campo de la joyería, este tipo de resinas permite crear prototipos y fundir joyas con detalles intrincados, estas resinas son diseñadas para la fundición de inversión directa, permitiendo pasar directamente del diseño digital a una impresión en 3D [20].

- **Experimental**

La inclusión de aditivos y compuestos en la resina, abre campo para nuevos materiales experimentales como la cerámica, que produce piezas con una estética muy distintiva y se asemeja a una cerámica tradicional [20].

1.3. Norma ASTM

Este método de prueba cubre la determinación de las propiedades de tracción de plásticos reforzados y no reforzados en forma de muestras de prueba estándar con forma de mancuerna cuando se prueban en condiciones definidas de pretratamiento, temperatura, humedad y velocidad de la máquina de prueba.

El método de prueba es aplicable para probar materiales de cualquier espesor de hasta 14 mm (0.55 pulg.). Sin embargo, para analizar muestras en forma de láminas delgadas, incluida una película de menos de 1,0 mm (0,04 pulg.) de espesor, el método de prueba preferido es el estándar ASTM D882. Los materiales con un espesor superior a 14 mm (0,55 pulg.) Se reducirán mediante mecanizado [21].

1.3.1. Especímenes de prueba

Los especímenes de prueba que se van a elaborar para realizar los diferentes ensayos son de tipo V. Este tipo de especímenes especifica que se utilizarán cuando se encuentre disponible para la evaluación de un material limitado con un espesor de hasta 4mm (0,16 pulg.) donde se exponga un gran número de especímenes en un espacio limitado. El número de probetas que se sugiere elaborar son cinco para el ensayo de tensión de materiales isotrópicos, además, sugiere que las muestras que presenten defectos sean desechadas. [21]

1.3.2. Velocidad de testeo

En la tabla 1-3 se indica cinco tipos de opciones de probetas a evaluarse por lo que es importante considerar la clasificación a la que pertenecen según corresponda, la norma sugiere utilizar la velocidad más baja que se muestra en la tabla. Para el caso de los especímenes de tipo V, se debe utilizar una velocidad de 1, 10 o 100 mm/min [21].

Tabla: 1-3

Designación de Velocidad de pruebas [21]

Clasificación	Tipo de espécimen	Velocidad de testeo mm/min (in/min)	Tasa de deformación nominal inicio de la prueba mm/mm. min (in/in.min)
Rígidas y semirrígidas	I, II, III varillas y tubos	5(0.2)±25%	0.1
		50(2)±10%	1
		500(20)±10%	10
	IV	5(0.2)±25%	0.15
		50(2)±10%	1.5
		500(20)±10%	15
	V	1(0.05)±25%	0.1
		10(0.5)±25%	1
		100(5)±25%	10
No rígidas	III	50(2)±10%	1
		500(20)±10%	10
	IV	50(2)±10%	1.5
		500(20)±10%	15

1.4. Máquina de Ensayo

Para el desarrollo de los ensayos de las probetas se investigó que tipos de máquinas existen en el medio, y las diferentes características que estas presentan para seleccionar la más idónea.

1.4.1. James Heal Titan 10

Es una máquina de prueba universal con software TestWise™, disponible en modelos de 5kN y 10kN de capacidad. Un probador de tracción adecuado para probar una amplia gama de aplicaciones, desde prendas de vestir y no tejidos, hasta caucho y otros materiales no textiles [22].

Sus principales características son:

- Capacidad 10kN
- Espacio de ensayo 12cm*4,6cm
- Sistema altamente intuitivo para PC.
- Capacidad de control manual
- Peso 150Kg.

1.4.2. Sistema de ensayos bicolumna 5969

Los sistemas de ensayo de sobremesa y doble columna 5960 están diseñados para tener precisión, ser duraderos y ofrecer la flexibilidad necesaria para los cambiantes requisitos. Están diseñados con características estándar y opcionales que aumentan la eficacia de los ensayos y mejoran la experiencia del operador. Los sistemas de doble columna son instrumentos de uso genérico habitualmente utilizados para plásticos, metales, materiales de caucho, componentes de automoción, materiales compuestos y aplicaciones a temperaturas no ambientales [23].

Características:

- Capacidad 50KN
- Espacio de ensayo 47.7*67.4 pulgadas
- Velocidad de adquisición de datos de hasta 1Khz
- Reconocimiento automático de transductor para células de carga y extensómetros.
- Exactitud de medición de carga de +/- 0.5% de lectura.
- Software de operación Bluehill 2

Para la selección de la máquina de ensayos idónea para el proyecto, se realizó una tabla de ponderación (tabla 1-4) con la cual se concluyó utilizar la máquina “James Heal Titan 10”.

Tabla: 1-4

Ponderación para las máquinas de ensayos [22,23]

Ponderaciones	Bicolumna 5969	James Heal Titan 10
Costo	1	5
Espacio de trabajo	4	3
Capacidad	5	4
Facilidad de operación	4	5
Precisión	4	3
Total	18	20

CAPÍTULO 2

2. Metodología

2.1. Diagrama de proceso

El desarrollo del proyecto se va a realizar siguiendo el proceso que se detalla en el diagrama de bloques presentado en la figura 2-1

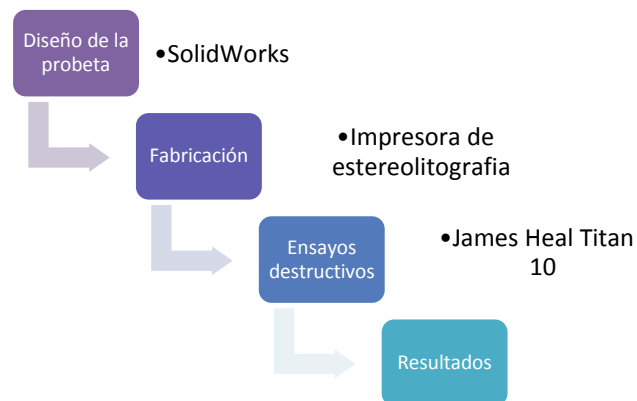


Fig. 2-1 Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto

2.2. Fabricación de las probetas

2.2.1. Diseño de probetas

Las dimensiones utilizadas para la elaboración de las probetas se las han seleccionado de la norma ASTM D638 se selecciona la probeta tipo V, esto debido a que son las probetas de menor tamaño lo cual reduce el gasto de material como sugiere la norma, en la figura 2-2 se muestra la forma de la probeta a fabricarse.

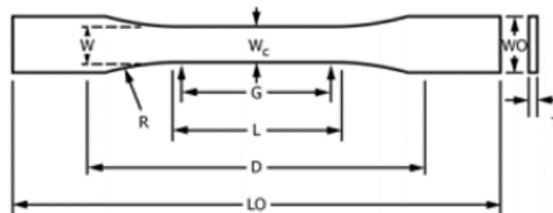


Fig. 2-2 Probeta tipo V acotada [21].

Las dimensiones por aplicarse para el diseño de la probeta se muestran en la tabla 2-1 donde se detallan las dimensiones correspondientes a cada letra asignada para aplicarse en el diseño de la figura anterior.

Tabla: 2-1

Dimensiones de la probeta tipo V [21]

Dimensiones	Valor (mm)	Tolerancia
W-Ancho de sec. estrecha	3,18	$\pm 0,5$
L-Longitud de sec. estrecha	9,53	$\pm 0,5$
WO-Ancho total	9,53	3,18
LO-Longitud total	63,5	...
G-Longitud calibrada	7,62	$\pm 0,25$
D-Distancia entre agarres	25,4	± 5
R-Radio de filete	12,7	± 1

La figura 2-3 muestra el diseño de las probetas se desarrollan en el software SolidWorks®

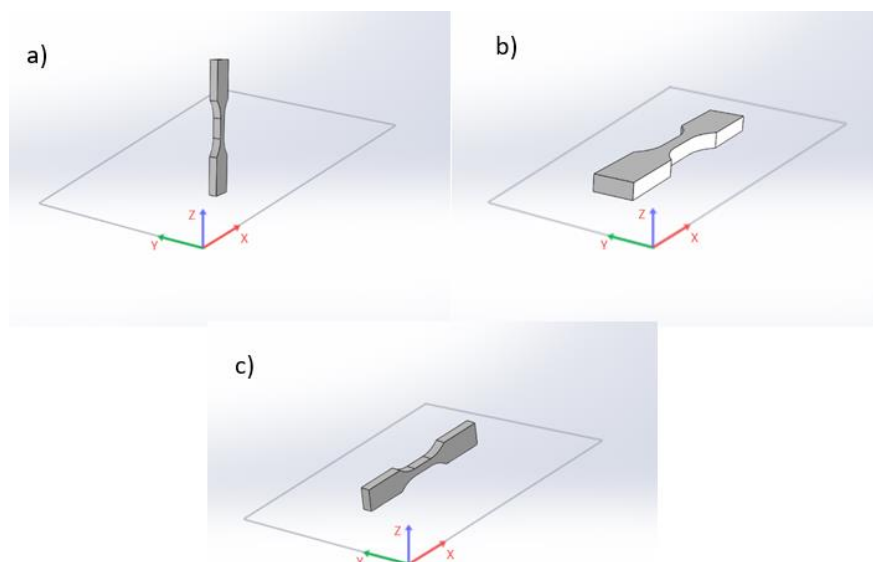


Fig. 2-3 Orientación: a) vertical, b) horizontal c) lateral.

Nota: se diseña con los tres tipos de orientaciones ya que al imprimir se mantiene la orientación de SolidWorks

2.2.2. Proceso de impresión

- Inconvenientes en el proceso de impresión

Antes de realizar la impresión de las probetas se examinó completamente la impresora para determinar los problemas existentes para posteriormente corregirlos y así desarrollar correctamente el presente trabajo. A continuación, se precisan los diferentes problemas encontrados y como han sido solucionados.

- Proyector

El proyector presenta una mala calibración en la resolución de la imagen además la ubicación de este no era la apropiada para obtener una buena impresión de las probetas. Como se puede observar en la figura 2-4 las probetas impresas poseen los bordes redondeados lo cual no corresponde al diseño realizado en SolidWorks debido a esto se extrajo el proyector y se calibró la resolución de la imagen disminuyendo el tamaño de los pixeles.

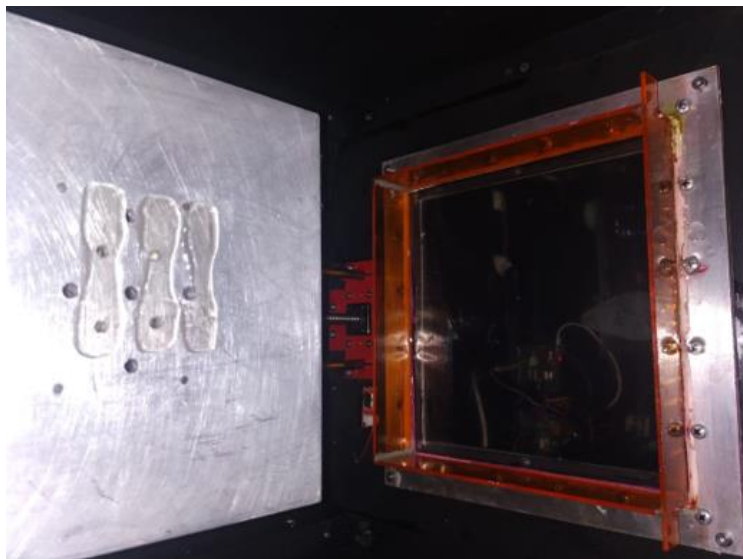


Fig. 2-4 Probetas impresas con una mala resolución

Por otro lado, se reubicó al proyector con una nueva base de soporte, en la figura 2-5 se muestra la base color gris la cual permite reducir el error del ángulo de incidencia de la luz en la pieza.



Fig. 2-5 Reubicación del proyector con la nueva base

Configuraciones previas a la modificación de posición del proyector, en las cuales en el programa nanoDLP se ingresaron valores extremadamente altos para realizar el proceso de fotopolimerización como muestra la figura 2-6; además de establecer nuevos tiempos de curado los cuales están dentro de los estándares establecidos por AnyCubic. Por último, se calibraron los ejes (X) e (Y) en el programa nanoDLP.

nanoDLP			
Módulos de Impresión	Perfiles de Resina	Control del Eje Z	Calibración del Proyector
Configuración	Terminal		
Capas de Fijación			
Número de Capas	Altura de Capa (µm)	Tiempo de Curado (Segundo)	Esperar antes de Imprimir (Segundo)
4	50,000000	30,000000	3,000000
Esperar tras Impresión (Segundo)	Elevarse tras de Imprimir (Minuto)	Esperar tras Elevarse (Segundo)	
0,000000	10,000000	0,000000	
Capas Normales			
Altura de Capa (µm)	Tiempo de Curado (Segundo)	Esperar antes de Imprimir (Segundo)	Esperar tras Impresión (Segundo)
100,000000	10,000000	1,000000	3,000000
Elevarse tras de Imprimir (Minuto)	Esperar tras Elevarse (Segundo)		
15,000000	0,000000		

Fig. 2-6 Programa nano DLP

- Recipiente de la resina (cuba)

El recipiente que contiene la resina a imprimirse presentaba ciertas fugas como se observa en la figura 2-7, lo cual conlleva a un desperdicio de material, para lo cual se procedió a impermeabilizar totalmente.



Fig. 2-7 Fugas de la cuba

- Plataforma de construcción

Al ubicar la plataforma de construcción en el punto cero (contacto de resina con la plataforma), se produjeron burbujas de aire, la plataforma no podía sacarlas al exterior. Por lo tanto, se procedió a perforar agujeros adicionales a la plataforma produciendo que el aire salga fácilmente como se muestra en la figura 2-8 evitando así imperfecciones en las piezas producidas por burbujas en su interior.



Fig. 2-8 Perforación de agujeros en la plataforma

- Adherencia

Las plataformas de construcción de impresoras comercializadas tienen una película de material que permite extraer la pieza de la plataforma sin demasiado esfuerzo, por otro lado, en la plataforma de construcción de la impresora a utilizarse no contiene este tipo de película, siendo necesario probar con varios tipos de cintas adhesivas que nos permitan extraer la pieza sin romperla.

Se realizaron pruebas con diferentes tipos de cintas adhesivas por lo cual es importante mencionar que la cinta que tendrá contacto con las piezas como se muestra en la figura 2-9 debe tener ciertas porosidades (cinta verde), logrando así una mayor adherencia evitando que existan movimientos involuntarios en el proceso de fotopolimerización mientras haya deslizamientos en el eje (Z). Los tiempos de curado variaron en cuanto a la adherencia de la pieza (cambio de una cinta a otra).



Fig. 2-9 Cintas seleccionadas para impresión

Finalmente se utilizó como base la cinta adhesiva Abro P.O. 1174 la cual tiene una superficie lisa y como ventaja el material (resina) no es absorbido evitando de cierta

manera desperdicio del material y sobre ella la cinta Scotch 233+ la cual permite el desprendimiento de la pieza sin fracturas.

2.2.3. Tiempos de curado y espesor por capa

En este apartado se detallan las diferentes configuraciones utilizadas en la impresora, e impresión de las probetas necesarias para desarrollar el análisis de tracción.

- Configuración de las probetas horizontales

En este grupo se realizaron tres tipos de configuraciones, mirar tabla 2-2, las variables a modificarse son el tiempo de curado y el espesor por capa. Para el presente caso, el tiempo de curado se mantuvo en las tres configuraciones, el espesor por capa es la variable que se analiza para establecer el efecto que tiene este en las propiedades mecánicas de los especímenes de prueba.

Tabla: 2-2

Configuraciones "tiempos de curado y espesor por capa" impresión horizontal

Características "Impresión Horizontal"			
Tiempo de curado (s)	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
Capa de Adherencia	27	27	27
Capa Normal	6	6	6
Espesor capa(μm)			
Capa Adherencia	50	100	150
Capa Normal	100	150	200

El sentido de orientación para la impresión de las probetas fue en modo horizontal, tomando en cuenta que es importante el sentido de orientación al fabricar la

probeta en SolidWorks® ya que es ahí donde se define básicamente la orientación de la pieza al imprimir; en esta configuración se conserva el espesor por capa teniendo como constante el tiempo de curado.

- Configuración de las probetas laterales

El siguiente grupo presenta también tres tipos de configuraciones como en la sección anterior (tabla 2-2); en este caso, el espesor por capa se mantuvo en las tres configuraciones. Como se puede observar en la tabla 2-3 se modifica el tiempo de curado para analizar el efecto que puede generar en las propiedades mecánicas de los especímenes de prueba.

Tabla: 2-3

Configuraciones "tiempos de curado y espesor por capa" impresión lateral

Características "Impresión Lateral "			
Tiempo de curado (s)	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
Capa de Adherencia	27	30	35
Capa Normal	6	10	15
Espesor de capas (μm)			
Capa Adherencia	50	50	50
Capa Normal	100	100	100

El sentido de orientación para la impresión de las probetas fue en modo lateral, el tiempo de duración de la impresión fue mayor que el de la probeta horizontal y visualmente con el diseño de la probeta no se obtuvo un acabado superficial tan agradable como el de las otras dos orientaciones.

- Configuración de las probetas verticales

Por último, la tabla 2-4 muestra valores idénticos a los de la tabla 2-3, en este caso, se desea analizar la influencia de la orientación de impresión en las propiedades mecánicas de las probetas. Por lo cual el sentido de orientación fue de modo vertical.

Tabla: 2-4

Configuraciones "tiempos de curado y espesor por capa" impresión vertical

Características "Impresión Vertical "			
Tiempo de curado (s)	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
Capa de Adherencia	27	30	35
Capa Normal	6	10	15
Espesor de capas (μm)			
Capa Adherencia	50	50	50
Capa Normal	100	100	100

2.2.4. Proceso de impresión

Una vez obtenido el diseño de las probetas se procede a configurar los parámetros previamente mencionados y después realizar la impresión.

- Selección del modelo y configuraciones

Abrir el navegador en la dirección IP 169.254.86.65 comprobando así que exista conexión entre la impresora y el computador.

Importar el archivo en los formatos admitidos como: STL, SLC, SVG, añadiendo un nuevo modelo de impresión al software nanoDLP desde nuestra carpeta de archivos, una vez seleccionado, se mostrará en la ventana “moldes de impresión”, figura 2-10.

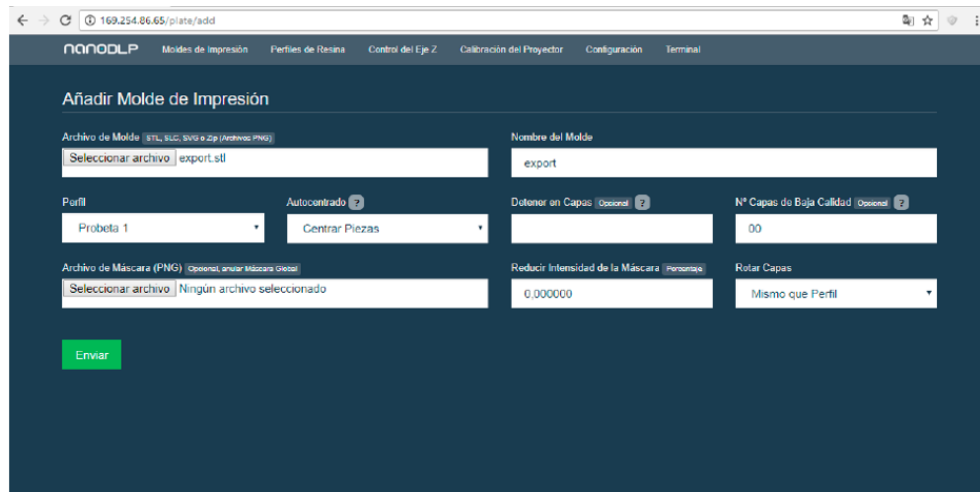


Fig. 2-10 Interfaz de la impresora 3D [4]

La pestaña “3D edit” permite ver el objeto antes de imprimirlo además de ubicar soportes y duplicarlo. Una vez cargado el modelo, configurar las características de la resina en la ventana “perfiles de resina”.

En la figura 2-11 se ilustran parámetros a modificarse como altura de capa, número de capa y tiempo de curado en capas de fijación y normales, respectivamente.

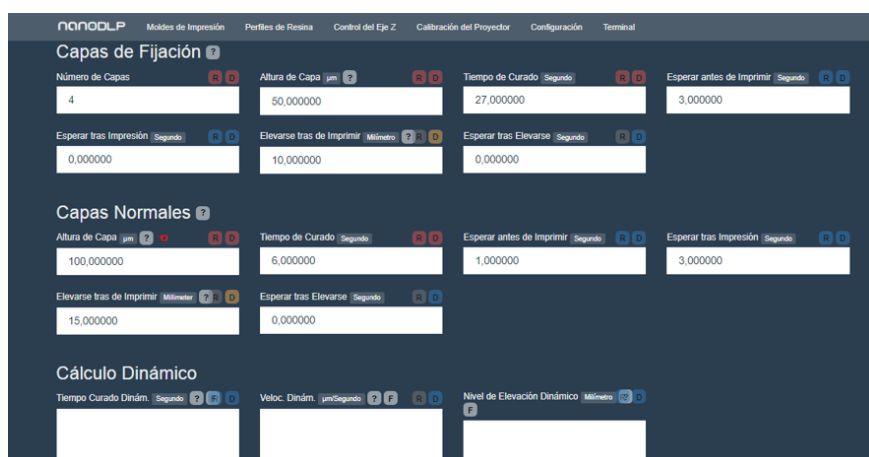


Fig. 2-11 Parámetros de espesor por capa y tiempo de curado

Una vez configurados los parámetros de impresión se procede a “recrear” el modelo para que genere las imágenes de las distintas capas y el código G que enviará las señales para el movimiento del motor paso a paso y el servomotor. Como se observa en la figura 2-12 es importante calibrar la base donde se adhiere la pieza comprobando que los tornillos estén totalmente fijos y que dicha base no posea ningún ángulo de inclinación.

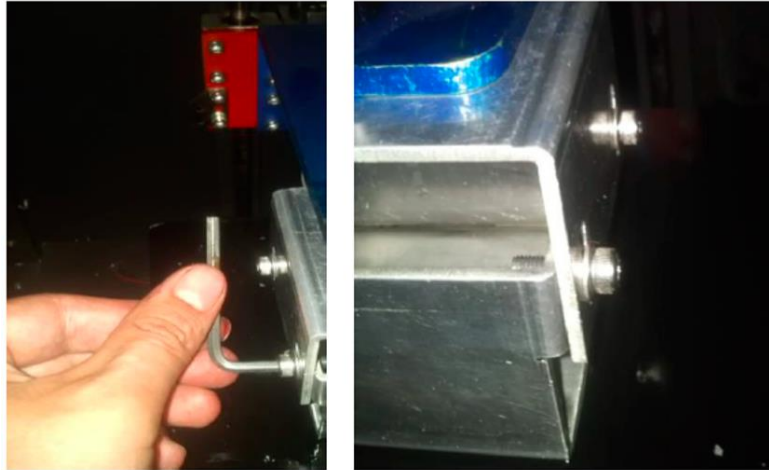


Fig. 2-12 Tornillos de soporte de la plataforma

Calibrar la impresora aflojando los 4 tornillos que se encuentran en los soportes de la plataforma, ir a la pestaña “Control eje Z” y ubicar en la posición “Home Printer Z Axis” para posicionar la plataforma en Z0, calibrar la impresora y ajustar los tornillos según corresponde.

Para comprobar una correcta calibración se debe introducir una hoja de papel bond entre la base de la plataforma de impresión mientras baja a Z0 y la lámina fep de la cuba en la cual la hoja deberá deslizarse aplicando la presión necesaria para un óptimo ajuste; una vez realizado este procedimiento, elevar la plataforma de construcción permitiendo así depositar el material dentro de la cuba evitando obstáculos, después agregar resina proporcionalmente, acorde al tamaño de la pieza a imprimir. Finalmente, mediante el software, imprimir la pieza desde el inicio.

En la figura 2-13 se muestra el estado de impresión donde se visualiza en tiempo real el estado de la impresión, número de capas a imprimirse e impresas, tiempo que tomará realizar la impresión y en caso de ser necesario, detener por completo el proceso.

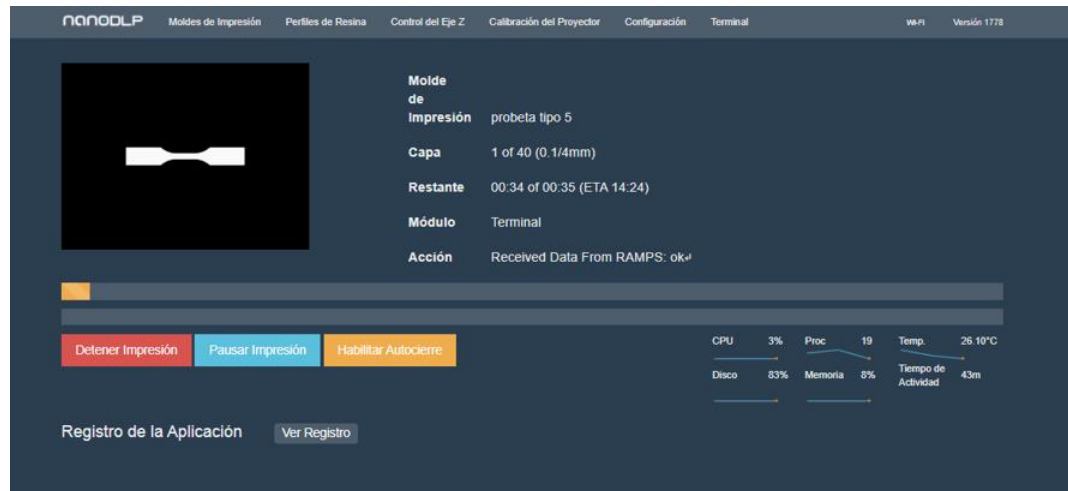


Fig. 2-13 Estado de la impresión.

Una vez terminada la impresión elevar la plataforma de construcción controlando el eje (Z). Tras retirar las probetas impresas, se verifica sus medidas coincidan con las requeridas; por último, como se observa en la figura 2-14 se procede a retirar las capas extras existentes en las probetas mediante un breve lijado



Fig. 2-14 Lijado de Probetas

Por cada tipo de orientación existen 3 diferentes configuraciones de probetas en las que cambian los parámetros de espesor por capa y tiempo de curado; se imprime un total de 45 probetas las cuales se someten a ensayos destructivos (tracción).

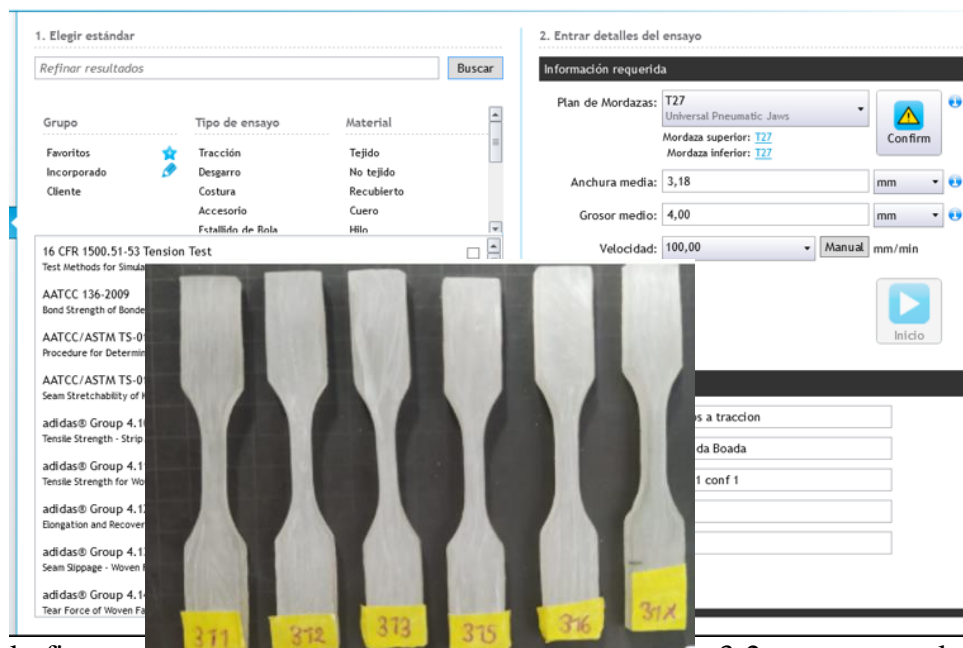
CAPÍTULO 3

3. Pruebas y resultados

3.1. Ensayos Destructivos

Para realizar los ensayos destructivos es necesario acatar los parámetros establecidos en la norma ASTM D638d como:

- Establecer la separación inicial de mordazas apropiada para las dimensiones de la probeta.
- La velocidad aplicada según los parámetros en la norma es de $V=100,00$ mm/min.
- Medir el espesor y ancho de cada probeta antes de realizar los respectivos ensayos. Se ingresa los valores de espesor y ancho de la probeta, además del tipo de ensayo a realizarse “tracción” número de probetas y velocidad como se muestra en la figura 3-1.



En la figura 3-2 se muestran las probetas que serán sometidas a los ensayos, con sus respectivas etiquetas.

Fig. 3-1 Configuración de parámetros a ejecutarse en el ensayo

Fig. 3-2 Probetas previo a someterse a ensayos destructivos

- d. Colocar la probeta de ensayo en las mordazas de la máquina de ensayo, teniendo cuidado de alinear el eje longitudinal de la probeta con una línea imaginaria que una los puntos de anclaje de las mordazas de la máquina como se muestra en la figura 3-3. Apretar las mordazas firmemente en la medida necesaria para minimizar el deslizamiento de la probeta durante el ensayo.



Fig. 3-3 Sujeción de mordazas y alineamiento de probeta

- e. Llevar a cabo los ensayos en la atmósfera estándar de laboratorio de 23 °C y 50% \pm 5% de humedad relativa.
- f. Desechar las probetas que fallan en algún defecto evidente o que fallan fuera de la longitud calibrada, figura 3-4, a menos que tales defectos o

condiciones constituyan una variable cuyo efecto se esté estudiando. Sin embargo, roturas en la mandíbula (fallas en el punto de contacto con la mordaza) son aceptables si se ha demostrado que los resultados de tales ensayos están en acuerdo esencial con los valores de las roturas que se producen dentro de la longitud calibrada.

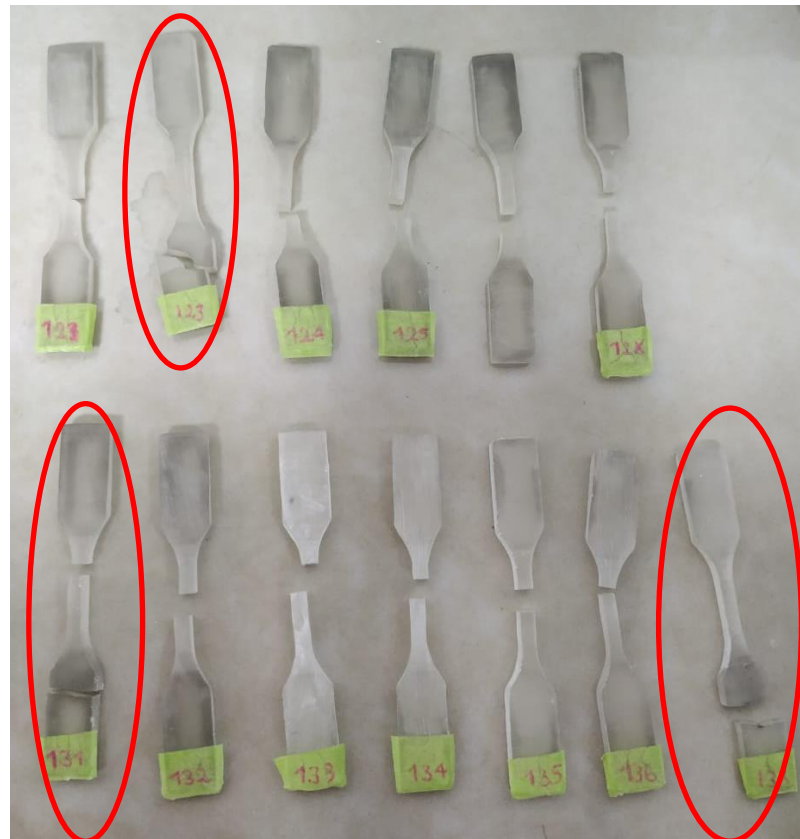


Fig. 3-4 Probetas desechadas

Las probetas que presentaron fracturas fuera de la zona de prueba fueron eliminadas como especímenes de prueba y reemplazadas.

3.2. Desarrollo de curvas

Tras haberse realizado los ensayos, se realiza una exportación a Excel de los datos obtenidos, los cuales se encuentran en unidades de fuerza y extensión. Se

proceden a obtener las curvas de esfuerzo deformación a partir de la longitud inicial de las probetas y el área transversal de la zona ensayada.

Con las curvas de esfuerzo deformación se procede a obtener los valores de esfuerzo máximo, deformación y módulo de elasticidad; tomando en cuenta que éstos son la media aritmética de los valores obtenidos para cada tipología de probeta.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos mediante ensayos destructivos de las diferentes configuraciones de impresión de las que se obtuvo una curva de esfuerzo deformación en las que se comprobó que la curva tiene un comportamiento elasto frágil lineal.

3.3. Esfuerzos

Se realiza una comparación de los resultados obtenidos mediante ensayos destructivos.

3.3.1. Esfuerzo obtenido con variación de tiempo de curado

La figura 3-5 muestra las impresiones en las tres configuraciones de posición con una capa de impresión fija de 100 μm para cada una; con una variación de tiempo de curado de 6, 10 y 15 segundos.

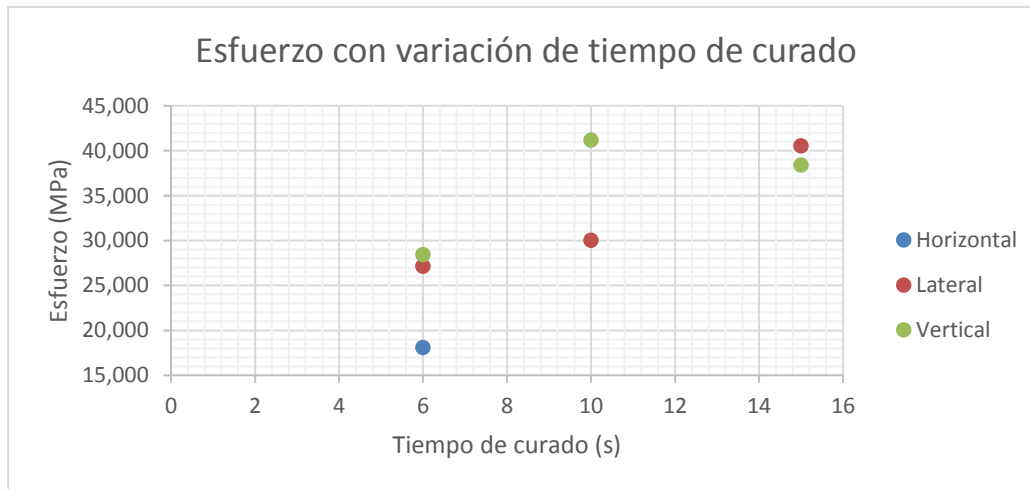


Fig. 3-5 Gráfica de esfuerzo máximo con variaciones en el tiempo de curado

Al analizar a 6 s y 10s la configuración vertical tiene mayor resistencia mecánica que las otra; se observa que a partir de los 10s tiende a estabilizar en el valor de su esfuerzo máximo siendo la mejor configuración para cuando se varía el tiempo de curado.

3.3.2. Esfuerzo con variación de espesor de capa.

La figura 3-6 muestra tres diferentes configuraciones de espesor por capa con un tiempo de curado constante de 6 segundos.

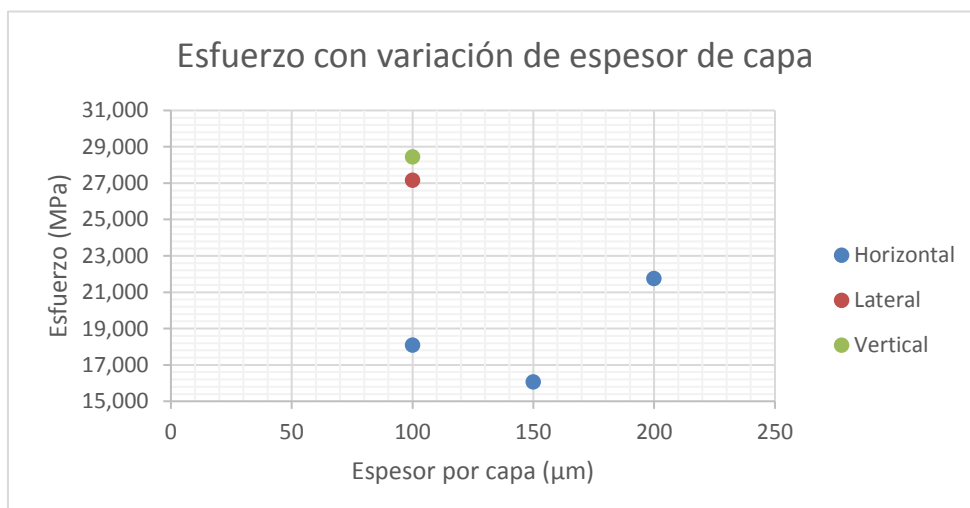


Fig. 3-6 Gráfica de esfuerzo máximo con variaciones en el espesor de capa

Al analizar la orientación horizontal se muestra que la probeta con espesor de capa de 100 μm incrementa su esfuerzo considerablemente al duplicarse el espesor a 200 μm . El esfuerzo máximo se obtiene de la configuración vertical superando un 56,44 % el esfuerzo de la configuración horizontal.

3.3.3. Deformación con variación de tiempo de curado.

Las probetas que muestran mayor deformación poseen el menor tiempo de curado como se observa en la figura 3-7; siendo la orientación horizontal la que logra una menor deformación.

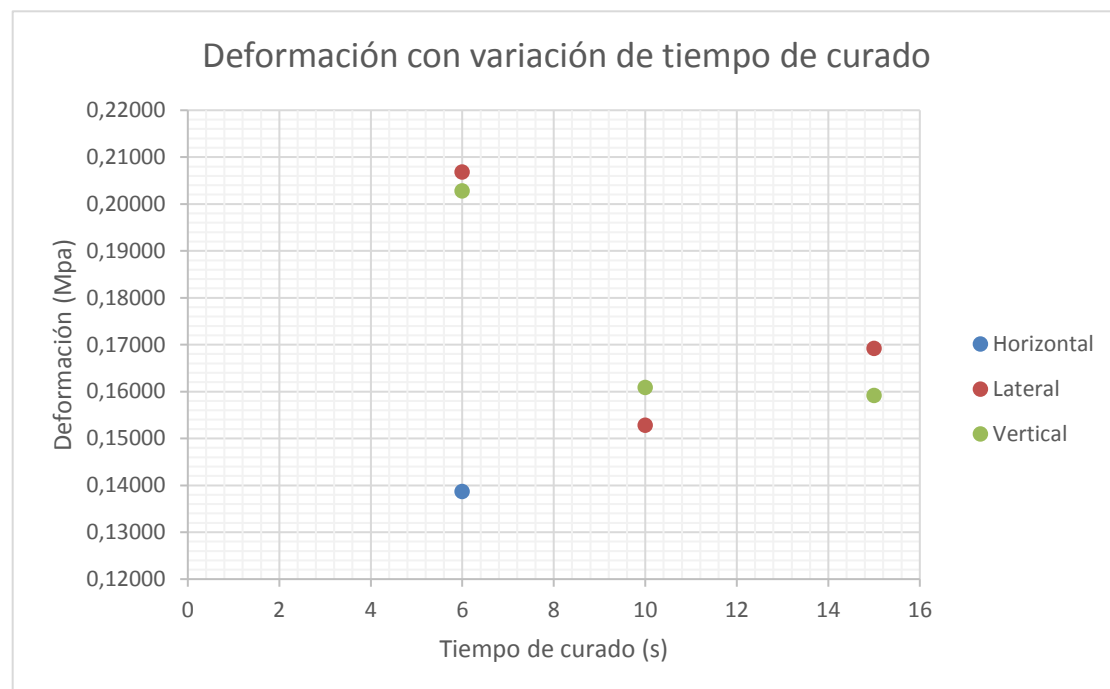


Fig. 3-7 Gráfica de deformación con variación de tiempo de curado

Al incrementar el tiempo de curado a 10 y 15 segundos las probetas con orientación vertical llegan a estabilizar su valor de deformación.

3.3.4. Deformación con variación de espesor de capa.

La figura 3-8 muestra la gráfica de deformación en función del espesor de capa, al incrementarse el espesor por capa con orientación horizontal se obtiene una menor deformación.

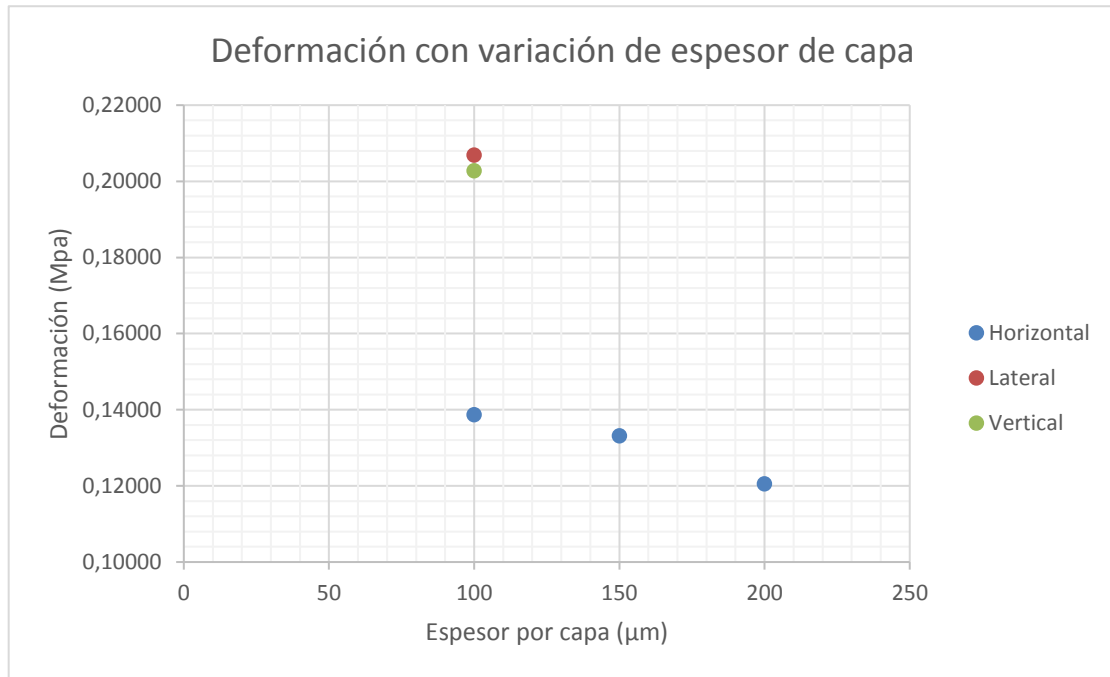


Fig. 3-8 Gráfica de deformación con variación de espesor de capa

Con un espesor de capa de 100 μm se obtiene una mayor deformación con orientación lateral similar a la vertical quedando la orientación horizontal muy por debajo de estas.

3.3.5. Módulo de elasticidad

Se procede a calcular el módulo de elasticidad, asumido como la pendiente de la recta; ya que el material tiene un comportamiento elasto frágil lineal. De este cálculo se obtiene la figura 3-9 y 3-10 que muestran la variación del tiempo de curado y del espesor por capa respectivamente.

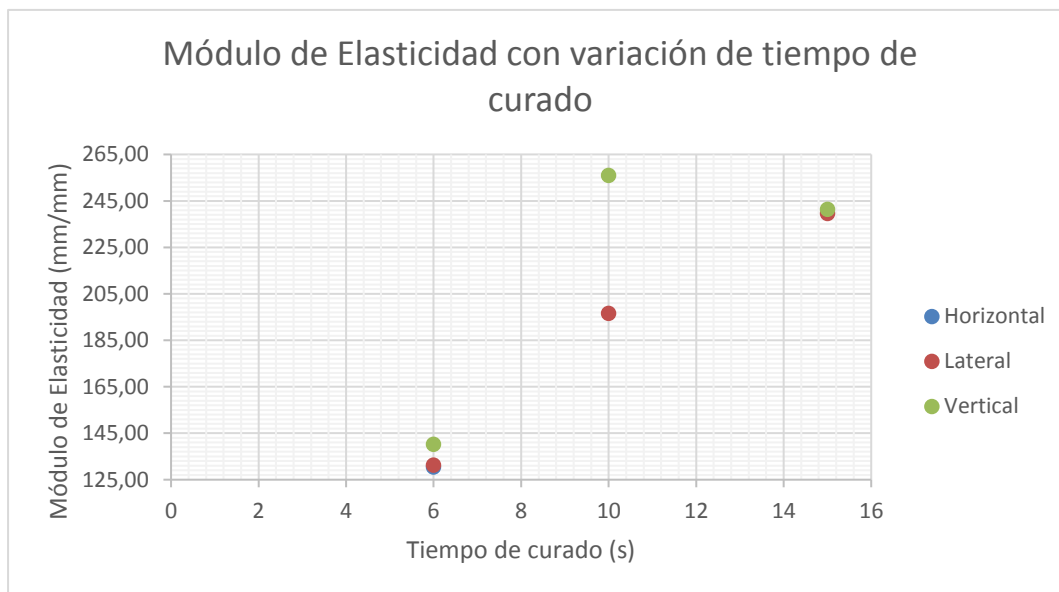


Fig. 3-9 Gráfica de Módulo de elasticidad con variación de tiempo de curado

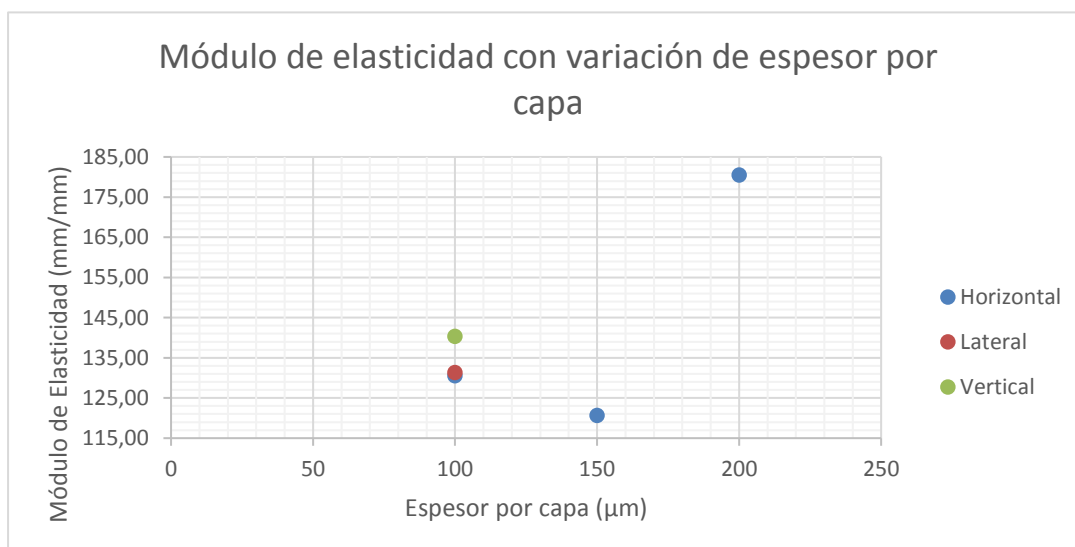


Fig. 3-10 Gráfica de Módulo de elasticidad con variación de espesor por capa.

Se observa en la figura 3-9 y figura 3-10 que el material se vuelve más rígido en todas las configuraciones de posición cuando se incrementa el tiempo de impresión o se duplica la capa de impresión.

3.4. Resultados generales por cada configuración

La tabla 3-1 muestra los resultados promedios de esfuerzo y deformación obtenidos a partir de los ensayos a tracción a los que fueron sometidas las probetas. Al ser una curva con tendencia lineal se procede a obtener el módulo de elasticidad a partir de la pendiente de esta; tomando en cuenta los valores promedio de esfuerzo y deformación.

Tabla: 3-1

Resultados generales

Conf.	Esfuerzo (Mpa)	Deformación (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Grupo 1 "Orientación Horizontal"			
1	18,095	0,13866	130,49
2	16,055	0,13313	120,60
3	21,748	0,12050	180,49
Grupo 2 "Orientación Lateral"			
1	27,155	0,20684	131,28
2	30,036	0,15279	196,58
3	40,552	0,16922	239,64
Grupo 3 " Orientación Vertical"			
1	28,445	0,20276	140,29
2	41,178	0,16088	255,97
3	38,417	0,15916	241,38

3.5. Propuesta de Parámetros

Una vez comparados los resultados de cada una de las configuraciones se procede a recomendar los parámetros adecuados en impresión por estereolitografía utilizando resina transparente de 405 nm.

La impresión debe ejecutarse con capas perpendiculares a la dirección a la que se va a aplicar la fuerza, configuración que mostró los mejores valores en resistencia mecánica ya que el objeto se encuentra sumergido totalmente en la resina y es curada en su totalidad la superficie de la capa simultáneamente, logrando con esto confirmar lo que nos indica la teoría en procesos DLP-SLA de impresión de la conformación de enlaces moleculares poliméricos entre las capas sin presencia de vacíos.

Esta orientación de impresión presenta las mejores propiedades mecánicas ya que esta obtiene valores de hasta un 60% adicional brindados por los fabricantes de la resina.

El espesor de capa adecuado en este tipo de impresión con el que se logra una buena resistencia mecánica y deformación es al utilizar capas de múltiplos de 100 μm .

El tiempo mínimo de curado para obtener buenas prestaciones es de al menos 10 s por cada 100 μm de capa.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Se estableció espesores de capa de entre 100 μm y 200 μm con variaciones de 50 μm para las configuraciones horizontal, vertical y lateral de impresión con tiempos de curado de 6, 10 y 15 segundos; para la manufactura de probetas tipo V según la norma ASTM 638.
- Se obtienen impresiones con una resistencia mecánica superior a las provistas por el fabricante de la resina a partir de tiempos de curado superiores a los 10s por capa, evidenciando que los tiempos menores sugeridos por el mismo no generan una impresión adecuada o superan la resistencia mecánica indicada.
- Se evidencia que se obtiene impresiones con un 60% de mejora en la resistencia mecánica con espesores de al menos 100 μm ; con respecto a los valores provistos por el fabricante de la resina.
- Las impresiones muestran un aumento de rigidez proporcional al incremento del espesor de capa y del tiempo de curado debido a una mayor exposición a la radiación de la resina.
- Los resultados del experimento muestran que se obtiene una impresión con mejores propiedades mecánicas cuando la capa de impresión es perpendicular a la dirección a la que se va a ejercer la fuerza, confirmando el enlace químico polimérico entre capas de impresión DLP-SLA.

4.2. Recomendaciones

- Los tiempos de exposición de la resina clear de Anycubic con otros colores de la misma marca varían, por lo que se podría realizar una investigación para establecer si la resistencia mecánica de los materiales depende también del color al que se va a exponer a la luz UV.

- Al finalizar la impresión se puede dar diferentes tipos de curado, éste influye también en la resistencia de la pieza, por lo que se podría establecer un análisis de resistencia mecánica con esta variable.
- Realizar una nueva investigación aplicando ensayos destructivos como flexión, torsión, resistencia al impacto y compresión para determinar si el material es uniforme ($S_{ut}=S_{uc}$).
- Realizar un estudio a nivel molecular del enlace entre capas al utilizar estereolitografía DLP que permita observar el proceso de enlace químico en las diferentes configuraciones.

Lista de referencias

- [1] K. Szykiedans and W. Credo, “Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints,” in *Procedia Engineering*, 2016, vol. 136, pp. 257–262.
- [2] A. Myriam, D. Directores, J. Santolaria, M. Francisco, and J. B. Dueso, “Diseño de una impresora 3D DLP,” Zaragoza 2014 Repositorio, 2014.
- [3] A. : Almeida Pavón, L. Javier, C. Castillo, and W. Geovanny, “Diseño y construcción de un equipo de impresión 3D con resina fotosensibilizable UV para elaborar prototipos de piezas por medio del proceso DLP,” Sangolquí, 2015.
- [4] P. Andres, H. López, I. Cosme, and D. Mejía, “Impresora 3D por Estereolitografía.” Universidad técnica del norte facultad de ingeniería en ciencias aplicadas carrera de ingeniería en mecatrónica, Ibarra-Ecuador, p. 94, 2018.
- [5] L. Huacón, “Evaluación De Polietilenos De Alta Densidad Reciclados Para Aplicaciones En Mobiliario Urbano.” Guayaquil-Ecuador, p. 108, 2011.
- [6] J. Cantrell *et al.*, “Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts,” Emerald, 2017.
- [7] K. 3. Inc, “Bean Printing Guide,” *Int. Licens. or Later*, 2018.
- [8] I. Gil Gil, “La impresión 3D y sus alcances en la arquitectura,” 2015.
- [9] “Materiales de impresoras 3D para impresoras de carbón - Carbono.” [Online]. Available: <https://www.carbon3d.com/materials/>. [Accessed: 21-Jan-2020].
- [10] C. Schmidleithner and D. M. Kalaskar, “Stereolithography,” 2016.

- [11] H. Kodama, “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 52, no. 11, pp. 1770–1773, Nov. 1981.
- [12] L.-H. Han, G. Mapili, S. Chen, and K. Roy, “Projection Microfabrication of Three-Dimensional Scaffolds for Tissue Engineering,” 2008.
- [13] S. Waheed *et al.*, “3D printed microfluidic devices: Enablers and barriers,” *Lab on a Chip*, vol. 16, no. 11. Royal Society of Chemistry, pp. 1993–2013, 2016.
- [14] J. Stampfl *et al.*, “Photopolymers with tunable mechanical properties processed by laser-based high-resolution stereolithography,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 18, no. 12, Dec. 2008.
- [15] “Proyector SVGA PJD5134 Controle la atención del público,” 2012.
- [16] R. Pandey, “Photopolymers in 3D printing applications,” 2014.
- [17] Photocentric Inc, “Ficha Técnica Resina Join3d,” p. 1, 2016.
- [18] ANYCUBIC, “Translucent UV Resin for DLP/SLA/LCD 3D Printer – ANYCUBIC 3D Printing.” [Online]. Available: <https://www.anycubic.com/collections/uv-resin/products/translucent-uv-resin-for-photon-series>. [Accessed: 13-Feb-2020].
- [19] Kudo3d, “TDS-UHR-m.pdf.” [Online]. Available: <https://bit.ly/39vxzlG>. [Accessed: 13-Feb-2020].
- [20] Garrido Gonzalo and Mansilla Alberto, “Diseño y fabricación de un dedo protésico articulado mediante impresión 3D,” *Univ. Valladolid*, 2019.
- [21] E3-95, “Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens,” *ASTM Int.*, vol. 82, no. C, pp. 1–15, 2016.

- [22] James Heal, “TestWise Titan Universal Testing Machine,” 2017.
- [23] “Sistemas de ensayo Bicolumna de la serie 5960 para ensayos de tensión, compresión, flexibilidad y pelado - Instron.” .