



Monitoreo del proceso y propiedades mecánicas de andamios porosos durante la impresión

3D por DLM

Serpa Andrade, Karolina Estefanía

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica

Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio

30 de octubre del 2020



Document Information

Analyzed document Trabajo Tesis.pdf (D82727080)
Submitted 10/26/2020 5:07:00 AM
Submitted by
Submitter email hvlara@espe.edu.ec
Similarity 0%
Analysis address hvlara.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Stefany_Pusda_Tesis_20200825.docx Document Stefany_Pusda_Tesis_20200825.docx (D78160153) Submitted by: hvlara@espe.edu.ec Receiver: hvlara.espe@analysis.arkund.com	 1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis__Maria_Gabriela_Orejuela_Tiaguaro.pdf Document Tesis__Maria_Gabriela_Orejuela_Tiaguaro.pdf (D82470727) Submitted by: hvlara@espe.edu.ec Receiver: hvlara.espe@analysis.arkund.com	 1



Escanea el código QR para:
HERNAN
VINICIO LARA
PADILLA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Monitoreo del proceso y propiedades mecánicas de andamios porosos durante la impresión 3D por DLM” fue realizado por la señorita Serpa Andrade, Karolina Estefanía el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de septiembre de 2020



HERNAN
VINICIO LARA
PADILLA

.....
Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio

DIRECTOR.

C. C.: 0603247362



DEPARTAMENTO DE LAS CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo **Serpa Andrade, Karolina Estefanía**, con cédula de ciudadanía n° 171982637-0, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Monitoreo del proceso y propiedades mecánicas de andamios porosos durante la impresión 3D por DLM** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 22 de octubre del 2020

Firma

Serpa Andrade, Karolina Estefanía

C.C. 171982637-0



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE LAS CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Serpa Andrade, Karolina Estefanía**, con cédula de ciudadanía n° 171982637-0, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Monitoreo del proceso y propiedades mecánicas de andamios porosos durante la impresión 3D por DLM** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 22 de octubre del 2020

Firma

Serpa Andrade, Karolina Estefanía

C.C. 171982637-0

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi familia que me ayudaron a seguir adelante en cada una de mis etapas durante mi vida universitaria y a mis profesores que me guiaron a culminar esta etapa final de mi carrera.

Serpa Andrade, Karolina Estefania

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, docentes y amigos que me ayudaron a cumplir con cada una de las metas propuestas dentro de mi vida universitaria.

Mi más profundo agradecimiento al Ing. Hernán Lara quién me guió y ayudó en mi inicio de investigación científica y tesis, al Ing Xavier Sánchez y Kleber Andrade Ph.D, los cuales me ayudaron en la comprensión de temas relacionados a mi tesis.

Serpa Andrade, Karolina Estefanía.

Índice de contenido	
Urkund	2
Certificación	3
DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTO	7
Índice de tablas	12
Índice de figuras.....	13
Resumen	16
Abstract.....	17
Glosario de términos.....	18
Capítulo I.....	19
Generalidades	19
Antecedentes.....	19
Justificación e Importancia	20
Alcance del Proyecto	22
Objetivos.....	23
Objetivo general	23
Objetivos Específicos	23
Capítulo II.....	25
Estado del arte	25
Definiciones	25

Manufactura aditiva	25
Proceso basado en láser	25
Proceso de Extrusión	27
Depósito de material	27
Estereolitografía	27
DLM	31
Andamios Porosos	32
Características	33
Fuerza de separación	36
Ingeniería biomédica	37
Ingeniería de tejidos	38
Biomecatrónica.....	38
Aplicaciones de las estructuras porosas en la ingeniería de tejidos	39
Evolución de la ingeniería de tejidos	39
Capítulo III	41
Diseño Experimental	41
Planificación del proceso	41
Objetivo del proceso.....	43
Definición de la meta	43
Caracterización de la resina.....	43

	10
Diseño Experimental	43
Materiales y equipos a utilizar	45
Espesor de capa	45
Medición de dureza Vickers	46
Medición de radiación UV-A	47
Diseño de Probetas tipo matriz	49
Diseño CAD y experimental	49
Fabricación y medición de probetas	50
Diseño de estructuras para la caracterización de resina en verde.....	51
Diseño en CAD	52
Diseño experimental de la estructura para la caracterización de resistencia en verde	52
Fabricación de probetas	53
Diseño de estructura porosa	54
Diseño experimental de construcción de andamios	55
Monitoreo de impresiones y sensor	56
Análisis de datos	56
Capítulo IV.....	57
Análisis y discusión de resultados.....	57
Resultados de la caracterización del material	57
Caracterización del material	57

	11
Metrología y control de calidad de estructuras impresas tipo matriz	61
Impresión de las estructuras para caracterización de resistencia en verde	64
Análisis de la estructura mediante el uso de elementos finitos	68
<i>Impresión de estructuras porosas</i>	72
Análisis de estructuras porosas	73
Estructura porosa de un piso	73
Estructura porosa de tres pisos	78
Análisis de datos	81
Análisis de Gyroid	83
Influencia del mallado de la estructura sobre la simulación y fabricación de los andamios	
85	
Tortuosidad.....	89
Capítulo V.....	94
Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	94
Conclusiones.....	94
Recomendaciones.....	95
Trabajos a futuro	96
BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXOS	103

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros de diseño de andamios porosos para aplicaciones en ingeniería de tejidos óseos.....	35
Tabla 2 Características de la Resina.....	43
Tabla 3 Parámetros constantes durante la experimentación.	51
Tabla 4. Factores y niveles del Taguchi Es	53
Tabla 5 Parámetros de impresión.....	55
Tabla 6 Fuerza Máxima de separación	65
Tabla 7 Esfuerzos máximos de las Estructuras para caracterización de resistencia en verde.	71
Tabla 8 Parámetros de impresión.....	72
Tabla 9 Características físicas de las estructuras porosas	72
Tabla 10 Esfuerzos máximos de andamios porosos	81
Tabla 11 Características geométricas de los Gyroid.	84
Tabla 12 Medición de áreas transversales	86
Tabla 13 Esfuerzos de Von Mises a diferentes mallados.....	89
Tabla 14 Parámetros de simulación de fluidos.....	90

Índice de figuras

Figura 1 Esquema del sistema de impresión de estereolitografía. a) arriba hacia abajo b) abajo arriba.....	20
Figura 2 Marco propuesto de la implementación AM.....	21
Figura 3 Esquema del proceso MA de láser de polimerización	26
Figura 4 Esquema del proceso MA de láser de fundición.....	26
Figura 5 Mecanismo de curación.....	29
Figura 6 Impresora DLM	31
Figura 7 Andamios porosos. a) Gyroid (TPMS). b) Voronoi (Estocástico). c) Matriz (Lattice)	32
Figura 8 Partes de andamios porosos.....	34
Figura 9 Esquema de funcionamiento de la fuerza de separación durante la construcción de andamios porosos.....	36
Figura 10	37
Figura 11 Esquema de la ingeniería de tejidos	38
Figura 12 Diagrama de flujo del proceso de construcción de estructuras porosa en DLM parte 1.	41
Figura 13 Diagrama de flujo del proceso de construcción de estructuras porosa en DLM parte 2	42
Figura 14 Estructura para la obtención de espesor de curado.....	44
Figura 15 a) Aplicación de la resina en el portaobjetos. b) Realización de la prueba de curado ..	45
Figura 16 Esquema de posicionamiento de portaobjetos para la medición de espesor de capa .	46
Figura 17 a) Durómetro Metkon. b) Vista de probeta desde el durómetro.....	47
Figura 18 Esquema para la medición de irradiancia.....	48
Figura 19 Sistema de medición de radiación UV-A.....	48
Figura 20 Diseño de probeta para la calibración de escala de la impresora DLM.....	49
Figura 21 Sistema de impresión DLM	50

Figura 22 Estructura Experimental.	52
Figura 23 Esquema de impresión y monitoreo de estructuras para caracterización de resistencia en verde.	53
Figura 24 a) Andamio TPMS de un piso. b) Andamio TPMS de tres pisos	55
Figura 25 Dureza del material vs tiempo de exposición a la radiación.	57
Figura 26 Resina fotocurada a 20 [s] y 20 [V]. Escala=1 [μm].	58
Figura 27 Esquema de radiación UV	59
Figura 28 Comparación del resultado final de una estructura porosa diseñada en CAD (izquierda) y una estructura impresa con una irradiancia alta (derecha).	60
Figura 29 Medición de radiación UV-A	61
Figura 30 Resultados de impresión en el eje X	62
Figura 31 Resultados de calibración en el eje Y	62
Figura 32 Estructuras impresas a diferentes velocidades de avance, V_a . a) $V_a = 50$ [$\mu\text{m/s}$]. b) $V_a = 100$ [$\mu\text{m/s}$]. c) $V_a = 150$ [$\mu\text{m/s}$]. Escala = 5 [mm].	64
Figura 33 Velocidad de elevación vs. fuerza máxima de separación a 20, 25 y 30 [s] de tiempo de curación (t).	65
Figura 34 Comportamiento de la Fuerza de separación durante la impresión de la probeta	67
Figura 35 Proceso a seguir para la simulación en elementos finitos.	68
Figura 36 Mallado de estructura para caracterización de resistencia en verde.	70
Figura 37 Esfuerzos de Von Mises en la estructura para caracterización de resistencia en verde	70
Figura 38 Andamios Porosos. a) Sin Taubin Smooth. b) Con Taubin Smooth.	73
Figura 39 Fuerza de separación de estructuras porosas. a) Estructura porosa de 3 [mm] de lado. b) Estructura porosa de 4 [mm] de lado. c) Estructura porosa de 5 [mm] de lado.	74
Figura 40 Área en exposición en la mitad del andamio	76
Figura 41 Esfuerzos de Von Mises de los andamios porosos de 1 piso.	77
Figura 42 Fuerza de separación de estructura porosa de tres pisos	78
Figura 43 Diagrama de fuerzas obtenido del programa EDMS	79

Figura 44 Esfuerzos de Von Mises de los andamios porosos de 3 piso	80
Figura 45 Esfuerzo Vs. Capa de impresión de andamios porosos de 1 piso.....	82
Figura 46 Esfuerzo Vs. Capa de impresión de andamios porosos de 3 pisos.	83
Figura 47 Esfuerzo de Von Mises en Gyroids.....	84
Figura 48 Mallado de estructuras. a) Mallado de 40. b) Mallado de 100. c) Mallado de 200.....	85
Figura 49 Esfuerzos de Von Mises a diferentes mallados. a) Mallado de 40. b) Mallado de 100. c) Mallado de 200.	87
Figura 50 Trayectoria del fluido	90
Figura 51 Velocidad de Flujo en las diferentes secciones en los andamios porosos de un piso ...	91
Figura 52 <i>Velocidades de fluidos de los andamios poros de tres pisos</i>	92
Figura 53: Velocidades de Flujo del Gyroid de porosidad de 52%.....	93

Resumen

Los procesos de fabricación basados en manufactura aditiva es una tecnología en crecimiento para la investigación en áreas de gran interés como la medicina y la industria. Los procesos de fabricación mediante manufactura aditiva fabrican partes capa por capa directamente a partir de un modelo computacional 3D que puede ser de alto valor, complejo y personalizado. El proceso de manufactura aditiva conocido como Manufactura Digital con Luz (DLM, por sus siglas en inglés) emplea luz UV-A para solidificar capas de resina fotocurable dando lugar a complejos modelos (sólidos o porosos) que son empleados principalmente en aplicaciones de alto desempeño. Uno de los mayores inconvenientes en este proceso es la fuerza de separación que se produce debido a la adhesión y el efecto de vacío al solidificarse cada capa de impresión. Esta fuerza de separación produce que la pieza se deforme o se rompa durante el proceso de fabricación. Este problema se vuelve más crítico cuando se trata de la fabricación de piezas porosas, las cuales son muy empleadas en aplicaciones biomédicas como la ingeniería de tejidos ósea. Para monitorear el proceso durante la fabricación de piezas porosas por DLM se midió la fuerza de separación in-situ, junto a un estudio de la máquina y la selección de resina fotocurable, además se hizo pruebas de velocidades de elevación versus tiempos de curado obteniendo que, a mayor tiempo de exposición, mayor es la fuerza de separación. La velocidad óptima encontrada para la impresión de piezas porosas fue de 50 [$\mu\text{m/s}$] con un tiempo de exposición a radiación UV-A de 25[s], produciendo una fuerza máxima de 4 [N].

Palabras claves

- **DLM**
- **FUERZA DE SEPARACIÓN**
- **ANDAMIO POROSO**

Abstract

Manufacturing processes based on additive manufacturing is a growing technology of high priority for research in areas of great interest such as medicine and industry. Additive manufacturing processes manufacture parts layer by layer directly from a 3D computational model that can be high-value, complex, and customized. The additive manufacturing process known as Digital Light Manufacturing (DLM) uses UV-A light to solidify layers of photocurable resin, giving rise to complex patterns (solid or porous) that are mainly used in high-performance applications. One of the biggest drawbacks in this process is the separation force that occurs due to adhesion and the vacuum effect as each print layer solidifies. This separation force causes the part to deform or break during the manufacturing process. This problem becomes more critical when it comes to the manufacture of porous parts, which are widely used in biomedical applications such as bone tissue engineering. To monitor the process during the manufacture of porous parts by DLM, the separation force was measured in-situ, together with a study of the machine and the selection of photocurable resin, in addition, tests of lifting speeds versus curing times were made, obtaining that The longer the exposure time, the greater the separation force. The optimum speed found for printing porous pieces was 50 [$\mu\text{m/s}$] with an exposure time to UV-A radiation of 25 [s], producing a maximum force of 4 [N]. In addition, a finite element simulation study was carried out for the green strength of the porous printed pieces and their tortuosity.

Key words

- DLM
- SEPARATION FORCE
- UV RADIATION

Glosario de términos

Estructuras Estocásticas: Estructuras cuya porosidad está distribuida de manera estocástica.

Fuerza de Separación: Fuerza que se obtiene como resultado de la separación del objeto que se imprime con la base de la tina de impresión después de la exposición a la radiación UV.

Bulk Material: Material en bruto.

Curación: Tiempo de exposición de la resina a la radiación UV para la solidificación de la capa.

Polimerización: Es la combinación de monómeros para la formación de polímeros de cadenas largas (Smith, 1999).

Radiación UV: También conocida como radiación ultravioleta, es la radiación electromagnética dentro de un rango onda determinado (Matveev, 1988).

Periódico: Frecuencia con la que se repite un comportamiento físico.

Porosidad: Porcentaje de cuan vacío está una pieza.

Sobrecurado: Es la exposición de la resina durante un tiempo mayor al tiempo de curado.

Espesor de capa: Se refiere a la altura desde la base de la tina de la impresora hasta la base del eje z en la primera capa de impresión.

CAD: Diseño asistido por computadora.

Tortuosidad: La dificultad de la trayectoria de un fluido a atravesar un medio poroso (Fonseca-Páez et al., 2019).

Objeto en Verde: Cuando la resina fotocurable termina el proceso de impresión y aun no es llevado al proceso de post curado.

TPMS: Superficie mínima Triple periódica

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

Los medios de fabricación de estructuras porosas son muy variados en el mercado, uno de los sistemas usados es la estereolitografía, el diseño de modelos y los problemas provocados durante la fabricación de estas estructuras ha llevado a al estudio de las fuerzas que intervienen en el proceso de impresión.

Un andamio poroso es una estructura tridimensional que contiene una porosidad, contralada en el mayor de los caso (Oleaga, 2015). El estudio de la construcción de estas estructuras en Ecuador ha sido nulo, sin embargo existen estudios extranjeros en los cuales se centran en la fuerza de separación durante la impresión, que es uno de los agentes principales para la rotura de estos mismos durante la impresión (Pan et al., 2017).

En este trabajo Study of Separation Force in Constrained Surface Projection Stereolithography se presenta un ambiente controlado, en cual se hace la impresión de varias estructuras, ya sean completamente sólidas o estructuras porosas, variando el espesor de capa (1, 2 y 3 [mm])y la velocidad de elevación en eje z (Pan et al., 2017). En la

Figura 1 se observa el sistema de impresión que se utilizó en este estudio.

Figura 1

Esquema del sistema de impresión de estereolitografía. a) arriba hacia abajo b) abajo hacia arriba



Nota: (Liravi et al., 2015)

Justificación e Importancia

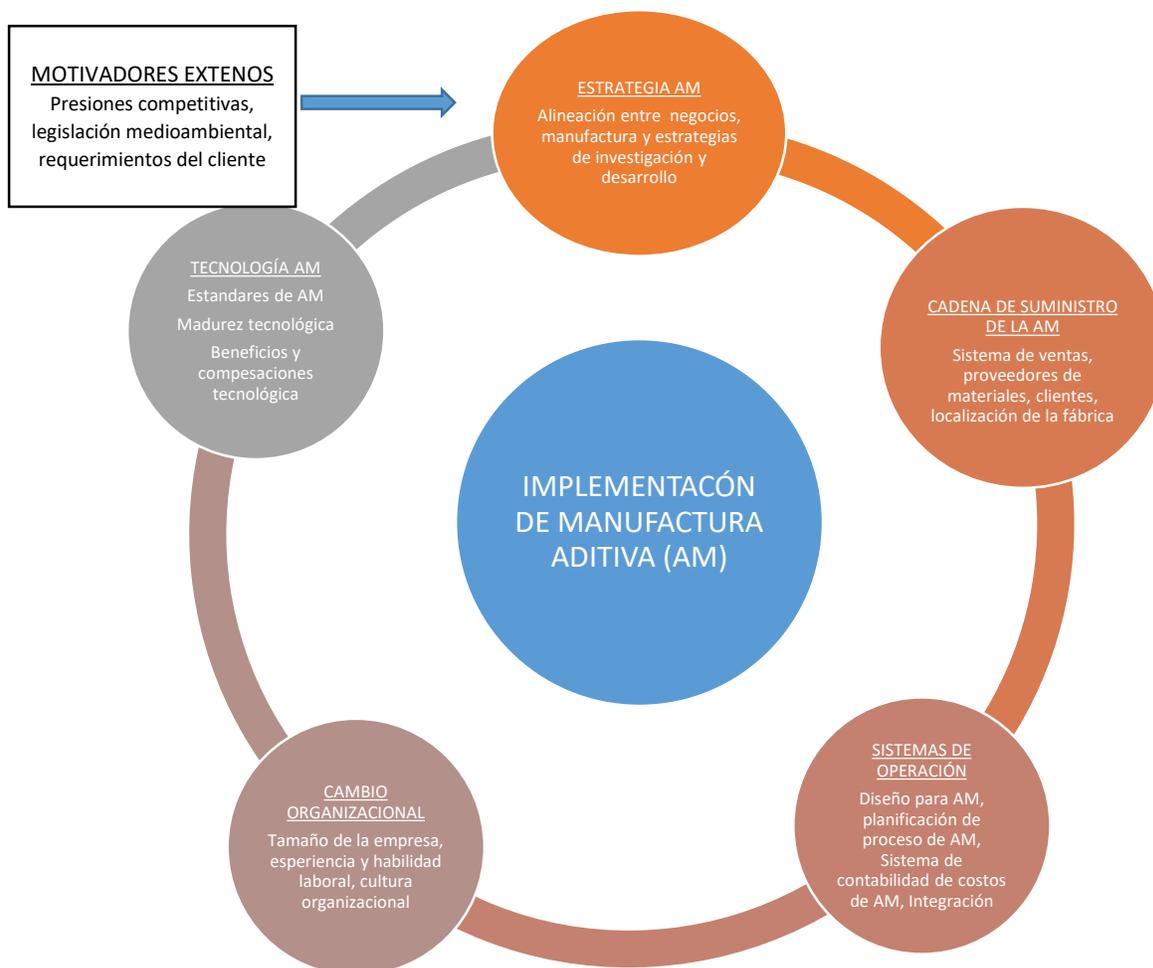
El proceso de manufactura aditiva para fabricar partes directamente desde modelos digitales tridimensionales, se ha mostrado con gran potencial para producir partes personalizadas complejas y de alto valor. Un alto número de compañías alrededor del mundo están usando manufactura aditiva para reducir el tiempo de mercadeo, mejorar la calidad de productos y reducir el costo de producción. Los polímeros son materiales atractivos a esta técnica debido a que son económicos, poseen un amplio rango de propiedades y son adecuados para tecnologías con fabricación de baja energía. En el sector industrial, las partes plásticas impresas con manufactura aditiva son usadas en varias aplicaciones que incluyen aeroespacial, automotriz, industria y dispositivos médicos.

Una de las aplicaciones con mayor demanda en la actualidad constituye la fabricación de andamios porosos, que son estructuras tridimensionales con alto grado de porosidad empleados en la fabricación de dispositivos médicos para la ingeniería de tejidos. Esto ha fomentado la investigación de alto nivel como la manufactura aditiva de estas estructuras. Sin embargo, aún se

realizan esfuerzos para determinar la confiabilidad de estos procesos de manufactura aditiva (DLM). La incertidumbre aumenta en este tipo de procesos y estructuras debido a que no se conocen los cambios en las propiedades mecánicas antes (*bulk properties*), durante (*green properties*) y después (*post-processing properties*) de su fabricación (trazabilidad). Uno de los casos más críticos durante la fabricación DLM es la fractura de las estructuras porosas lo que ocasiona pérdidas de material y tiempo debido a la destrucción de las piezas causadas por la fuerza de separación en el momento de la impresión 3D.

Figura 2

Marco propuesto de la implementación AM



Nota: (Mellor et al., 2014)

En la actualidad, se busca desarrollar sistemas de monitoreo, el cual permita determinar cuan factible puede ser el proceso de manufactura aditiva DLM para las distintas estructuras porosas y evitar los problemas anteriormente mencionados.

Alcance del Proyecto

El proyecto iniciará con la caracterización de la resina, para esto se procederá a medir espesores de capa y durezas de la resina, el diseño experimental para la obtención de las probetas que se usaran para la caracterización de la resina se lo hará con un Taguchi ortogonal de dos

factores (voltaje de los LEDS UV y tiempo de exposición a la radiación) y tres niveles (para el voltaje de 12, 8,25 y 7,34 [v] y para el tiempo de curación es de 5, 10 y 20 [s]), el cual se procesará, obteniendo una curva de curado para la calibración inicial de la impresora. Una vez realizada esta calibración a la impresora se realizará la impresión de 27 probetas para la graduación de la escala en los ejes x y y, ya que la impresora presentaba valores diferentes en estructura con valores de longitud menores a 10 [mm].

Se realizará la instalación del sensor de fuerza FG-3006 con el cual se medirá la fuerza de separación de las estructuras para caracterización de resistencia en verde (véase en Figura 22 Estructura Experimental) permitiendo obtener datos para la futura impresión de andamios porosos.

A continuación, se hará el diseño de la estructura porosa, para luego imprimirlas de acuerdo al diseño experimental, las cuales estarán siendo monitoreadas durante el proceso mediante el uso del programa EDMS que luego serán analizados por medio de la obtención de fuerzas de separación.

Objetivos

Objetivo general

Monitorear del proceso y fuerzas de separación de andamios porosos durante la impresión 3D por DLM

Objetivos Específicos

- Diseñar, modelar y construir estructuras porosas tipo andamio usando el enfoque matemático denominado superficies mínimas periódicas triples.
- Determinar las propiedades de resistencia mecánica, porosidad, diámetro de poro, tortuosidad de estructuras impresas en la impresora DLM.

- Generar recomendaciones para la realización de estructuras porosas en la impresora DLM.

Capítulo II

Estado del arte

Definiciones

Manufactura aditiva

Manufactura aditiva (MA) se refiere al proceso de unir material capa por capa con el fin de reproducir un objeto 3D modelado en CAD. La MA es usualmente aplicada para la construcción de objetos de compleja manufactura y/o personalizadas.

Existen varios tipos de procesos de MA en las cuales se puede dividir, principalmente se las clasifica por la forma en que se deposita las capas, el principio de operación y en el material que se usa para la creación de partes, estos métodos son: proceso basado en láser, proceso de extrusión y depósito de material (conocido de mejor manera como Material jetting).

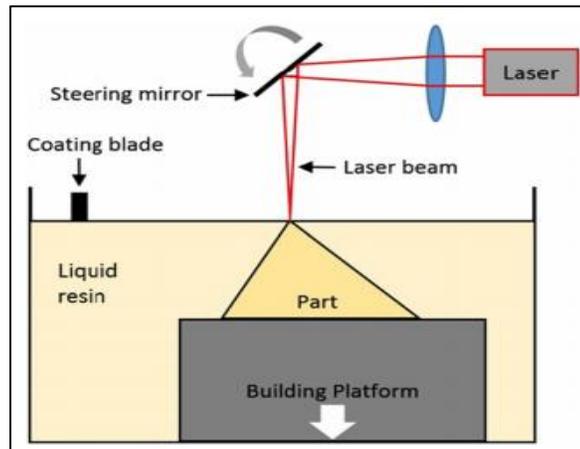
Proceso basado en láser

El proceso basado en láser hace uso de fuentes de medio a baja potencia dependiendo que material se funda, solidifique o cure, se divide en dos subcategorías que depende del cambio mecánico del material: láser de fundición y láser de polimerización.

Láser de polimerización: Está limitado a la polimerización donde el material cambia de la fase líquida a sólida produciendo la pieza final. En la Figura 3 se muestra un esquema del funcionamiento general del proceso de MA del método de láser de polimerización.

Figura 3

Esquema del proceso MA de láser de polimerización

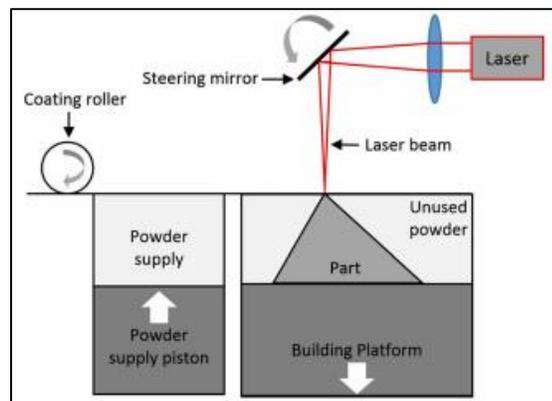


Nota: (Bikas et al., 2016)

Láser de fundición: Usa la fuente de láser para fundir el material suministrado en forma de polvo. En la siguiente Figura 4 se muestra el esquema del funcionamiento del proceso de MA de láser de fundición.

Figura 4

Esquema del proceso MA de láser de fundición



Nota: (Bikas et al., 2016).

Proceso de Extrusión

Es un proceso de MA térmico y hace uso del calor para ablandar o derretir el material, el insumo a usar generalmente es un tipo de plástico en forma de alambre.

Depósito de material

Este proceso de manufactura hace uso de una fina boquilla que rocía aglutinante de forma controlada para unir el material en polvo y finalmente formar la pieza deseada (Bikas et al., 2016).

Estereolitografía

La estereolitografía (SLA) convencional es un proceso de fotofabricación de fotón único que crea formas utilizando luz ultravioleta o solidifica selectivamente resinas fotocurables.

Hay dos enfoques básicos:

- *Direct laser-writing*¹
- *Mask-based writing*²

Estos dos enfoques se pueden clasificar en dos tipos: *free surface*³ y *constrain-surface*⁴. (Bártolo, 2011a).

Directo: consiste en el uso del láser para irradiar y curar el polímero presente en la tina, el sistema de control mueve la capa y controla los espejos para direccionar el láser hacia la superficie del polímero, que dibujará la sección transversal de la pieza. Luego se sumergirá en el polímero, dejando una película delgada, después de un tiempo de espera para recubrir del polímero líquido, se formará la siguiente capa (Bártolo, 2011b).

¹ Punto de luz directo

²Proyección de luz con máscara

³ Superficies libres

⁴ Superficies restringidas

La radiación ultravioleta que cura la superficie de la resina líquida se absorbe y se dispersa afectando la profundidad de curado, esta profundidad de curado sigue el comportamiento de la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Ecuación de la curva de trabajo

$$C_d = D_p \ln \frac{E_{max}}{E_c}$$

C_d	Profundidad de curado
D_p	Profundidad de penetración
E_{max}	Energía máxima de exposición
E_c	Energía crítica para el cambio de fase

Nota: (Jacobs, 1992)

La luz usada para la curación de las piezas es la radiación UV-A, cuya longitud de onda está comprendida entre 10 [nm] y los 400 [nm] (*Wayback Machine, 2016*).

Mask based: se realizan las piezas por medio de la exposición de la radiación de luz a través de una máscara que iniciará el proceso de curado en el área de exposición que forma cada sección transversal. Para la generación de estas máscaras se hace uso de un LCD, que despliega las máscaras de curado, por donde atraviesa la radiación de la luz (*Bártolo, 2011b*).

Proceso de curación

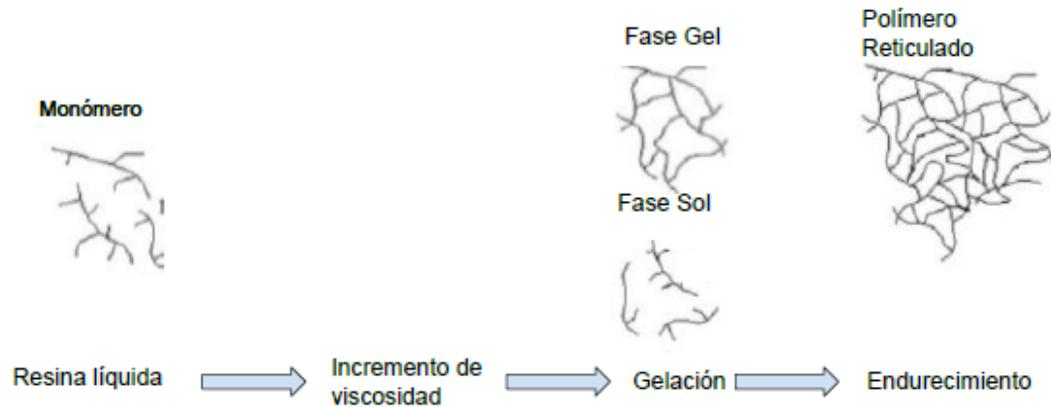
El proceso de curación es un proceso de polimerización exotérmico caracterizado por las reacciones químicas de reticulación que forma una estructura 3D infusible, insoluble y altamente reticulada. Esta reacción inicia cuando se suministra la energía (Radiación UV). En la **Figura 5** se muestra el esquema del proceso de curación de una resina fotocurable.

La gelación, está asociado al incremento dramático de viscosidad, en este estado coexisten dos fases, la fase gel y la fase sol. La fase gel es la parte gelificada, la cual es insoluble

en disolventes no degradables, la fase sol es la parte que permanece soluble y puede ser extraída con solventes (Bártolo, 2011b) .

Figura 5

Mecanismo de curación



Nota: (Bártolo, 2011b)

Operaciones Básicas

Las operaciones básicas realizadas para la impresión de piezas en SLA según Jacobs son:

Modelado CAD: Es el diseño tridimensional en computadora de la pieza a imprimir

Traductor: es la obtención de la pieza modelada en CAD, en formato STL. En la actualidad la mayor parte de los programas utilizados para el modelamiento de la pieza tienen la opción de guardar la estructura en formato STL.

Soportes: Es necesario la generación de soportes si la pieza lo amerita. Los programas utilizados para la generación de estas son sistemas de la misma empresa que provee la impresora.

Capa: La estructura total es dividida en capas paralelas a la base que tienen un espesor de capa determinado.

Unión: La unión de las capas se las hace por medio del sobrecurado presente durante la impresión.

Preparado: Es el paso de preparación de parámetros tales como el número de capas, periodo de escurrido, z-espera.

Construcción: Consiste en los siguientes pasos.

- **Nivelación:** Nivelación de compensación de la estructura, ya que tiene un encogimiento del 5 a 7 % del volumen total.
- **Elevación.** - es el establecimiento del espesor de capa que será curado
- **Velocidad de Elevación.** - Determina la velocidad en la que el eje z se mueve.
- **Escurreido.** – Es el tiempo utilizado para escurrir la resina excedente presente en la pieza después de la impresión de cada capa. El tiempo sugerido es de 5 [s].
- **Z espera.** – Es el tiempo de espera para la curación de capa por medio de la radiación UV. Este tiempo de espera va desde 15 [s] hasta los 30 [s]. Para el sobrecurado, es necesario un tiempo de z espera mayor a 45 [s]

Terminación y drenaje de piezas: Una vez completada la construcción de la pieza, la plataforma se eleva hasta la altura donde la pieza se encuentra fuera de la tina llena de resina, permitiendo drenar la resina restante en la estructura impresa hacia la tina.

Remoción, limpieza y alzamiento: Se remueve la pieza de la plataforma haciendo uso de guantes de latex, luego se seca el exceso de resina y se limpia la pieza con solventes de limpieza, para luego exponer la pieza a aire comprimido de baja presión.

Postcurado: Para este punto la estructura ha sido parcialmente polimerizada, siendo llamado estado en verde (resina en verde). Debido a esto se procede a realizar el postcurado, que es la exposición de la pieza en radiación UV dentro de un aparato dedicado a este procedimiento.

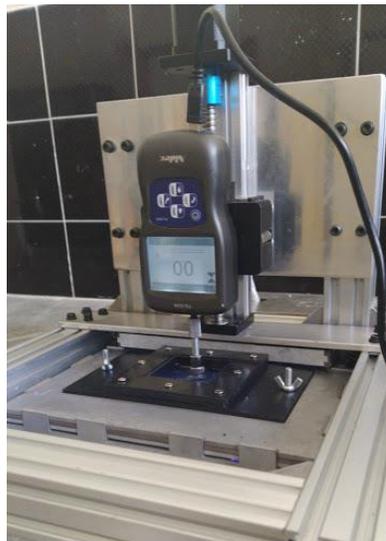
La mayor parte de las estructuras pueden estar completamente curadas después de dos o tres horas de exposición, pero en algunos casos, la exposición puede durar hasta 10 horas.

DLM

DLM (*digital light manufacturing*) es el proceso mediante el cual se elaboran objetos en 3 dimensiones, por medio del acoplamiento de capas sucesivas que vienen previamente delimitadas por un ordenador (Gibson et al., 2010). Siendo uno de tipos de manufactura aditiva de láser de polimerización que hace uso de fuente de poder a la radiación UV, la cual lleva al material (mayormente resina fotocurable) de líquido a sólido; la pieza se va formando por superposición de capas, además estos elementos hace uso de una pantalla digital que permite el paso de la radiación UV-A para la curación de las diferentes capas (Hatzenbichler et al., 2012).

Figura 6

Impresora DLM

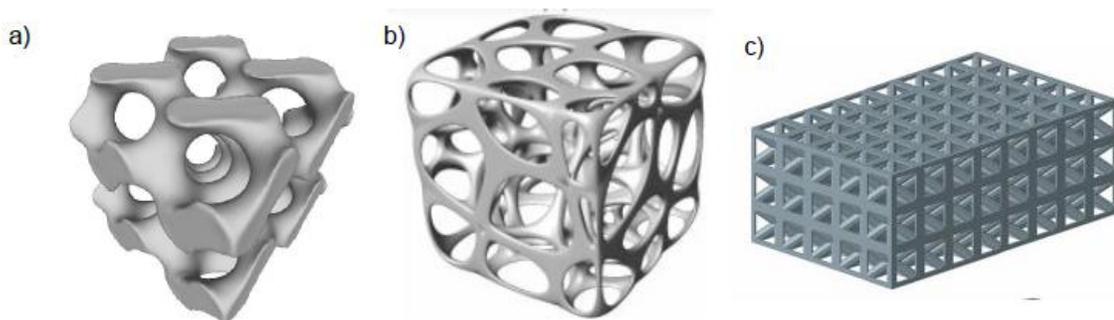


Andamios Porosos

Los andamios porosos son estructuras tridimensionales usadas mayormente en la ingeniería de tejidos para la regeneración de ciertas partes del cuerpo (Oleaga, 2015), estas estructuras porosas pueden ser de tres tipos: TPMS, estocásticas y matrices (Shi et al., 2018)..

Figura 7

Andamios porosos. a) Gyroid (TPMS). b) Voronoi (Estocástico). c) Matriz (Lattice)



Nota: (Gómez et al., 2016) (Egan et al., 2017)

Para decir que una estructura es TPMS debe estar definida por la siguiente ecuación:

Ecuación 2: Ecuación que define los TPMS

$$f(x, y, z) = \sum_{hkl} |F(hkl)| \cos(hX + kY + lZ - \alpha_{hkl}) = t$$

Donde:

$$X = \frac{2\pi x}{a}, Y = \frac{2\pi y}{a}, Z = \frac{2\pi z}{a}$$

(x, y, z)	Posición de los átomos en la estructura de cristal.
a	Denota la longitud de la celda cristalográfica.
$hkl, F(hkl)$	Denotan el ángulo de fase y la amplitud del factor de estructura.
t	Fracción de volumen de las dos regiones.

Nota: (Michielsen & Kole, 2003)

Un ejemplo de estructura TPMS es la estructura conocida como gyroid, cuya ecuación general es la siguiente:

Ecuación 3: Ecuación de un TPMS tipo Gyroid

$$\Phi_G = \sin(Nx)\cos(Ny) + \sin(Ny)\cos(Nx) + \sin(Nz)\cos(Nx) - C$$

N Parámetro de variación de diámetro de poro
C Parámetro para variación de ancho de viga

Nota: (Walker et al., 2017)

Características

En la actualidad existen varios modelos de estructuras porosas, pero los criterios de diseño para la ingeniería de tejidos son los siguientes:

- Diámetro de poro. – la longitud del poro de la estructura porosa.
- Porosidad. - Porcentaje de cuan vacío está una pieza. Esta característica se calcula con el volumen total de la estructura si fuera totalmente sólido y el volumen real del andamio.

Ecuación 4: Porosidad

$$\%p = \left(1 - \frac{V_{ap}}{V_s}\right) \times 100\%$$

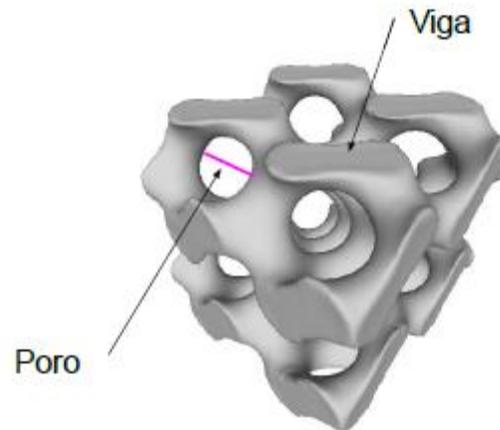
$\%p$ Porcentaje de porosidad
 V_{ap} Volumen real del andamio poroso
 V_s Volumen total de la estructura sin porosidad

- Tortuosidad. - Determina cuanta facilidad tiene un fluido en transportarse por medio de los poros (Starly et al., 2007).
- Vigas. - Es la parte sólida que interconecta toda la estructura.
- Estructura geométrica

- Propiedades mecánicas

Figura 8

Partes de andamios porosos



Una de las aplicaciones principales aplicaciones de los andamios porosos es en la ingeniería de tejidos, en la cual se trata de reproducir la porosidad presente del tejido, la

Tabla 1 muestra los parámetros de diseño para la creación de un andamio con una porosidad similar a la de un hueso del ser humano.

Tabla 1

Parámetros de diseño de andamios porosos para aplicaciones en ingeniería de tejidos óseos

Parámetros	Requerimientos
Porosidad	Máximo sin comprometer la mecánica propiedades significativamente
Tamaño de Poro	300 - 500 [μm]
Estructura del poro	Altamente interconectado
Propiedades mecánicas	
Hueso esponjoso	Tensión y compresión Esfuerzo: 5-10 [MPa] Módulo: 50-100 [MPa]
Hueso cortical	Tensión Esfuerzo: 80-150 [MPa] Módulo: 17-20 [GPa] Compresión Esfuerzo: 130-220 [MPa] Módulo: 17-20 [GPa] Dureza a la fractura: 6-8 [MPa] \sqrt{m}
Propiedades derivadas	
Tiempo de degradación	Debe adaptarse para que coincida con la aplicación en pacientes
Mecanismo de degradación	Erosión a granel o superficial
Biocompatibilidad	Sin inflamación crónica
Esterilización	Esterilizable sin alterar las propiedades del material

Nota: (Thavornyutikarn et al., 2014)

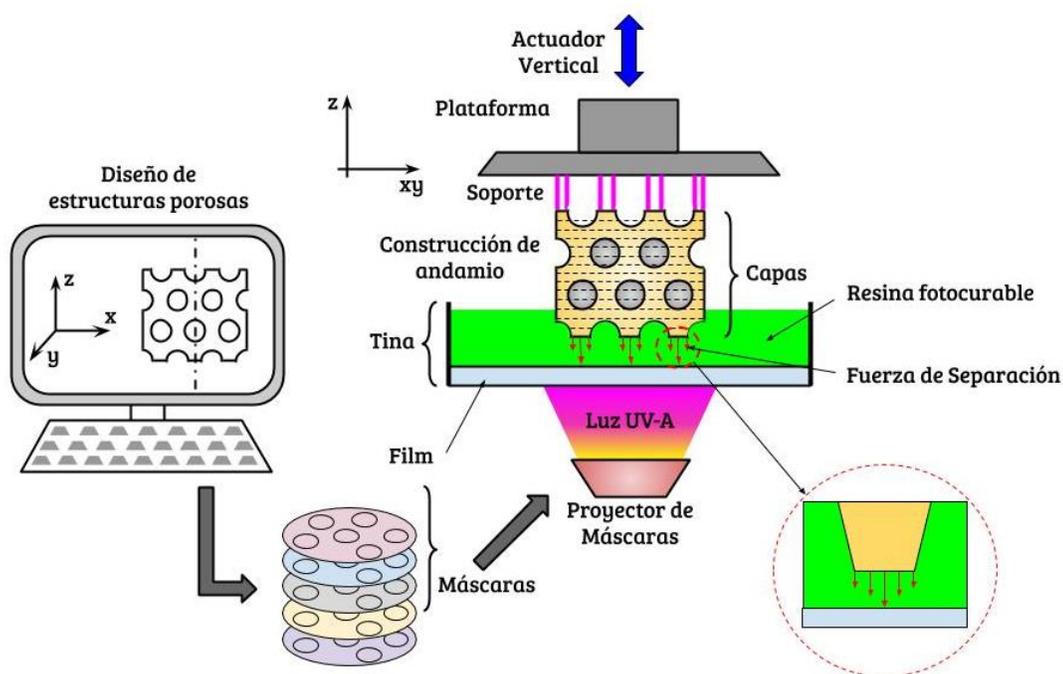
Para la obtención de la porosidad de las estructuras primero se toma una tomografía del hueso a simular y luego se lo procesa de tal manera que se obtiene la estructura vaciada y con la porosidad del hueso, una vez realizado esto se modela la estructura con la porosidad deseada y el diámetro de poro óptimo (Thavornnyutikarn et al., 2014).

Fuerza de separación

La manufactura de andamios porosos se la realiza mediante el proceso de Estereolitografía, al momento de realizar el proceso de impresión, una de las mayores dificultades presentes es la fuerza producida cuando la estructura se separa de la base de la tina (Fuerza de Separación), una vez finalizada la curación de cada capa de la estructura. En la Figura 9 se muestra el esquema de funcionamiento de las fuerzas de separación sobre la estructura porosa.

Figura 9

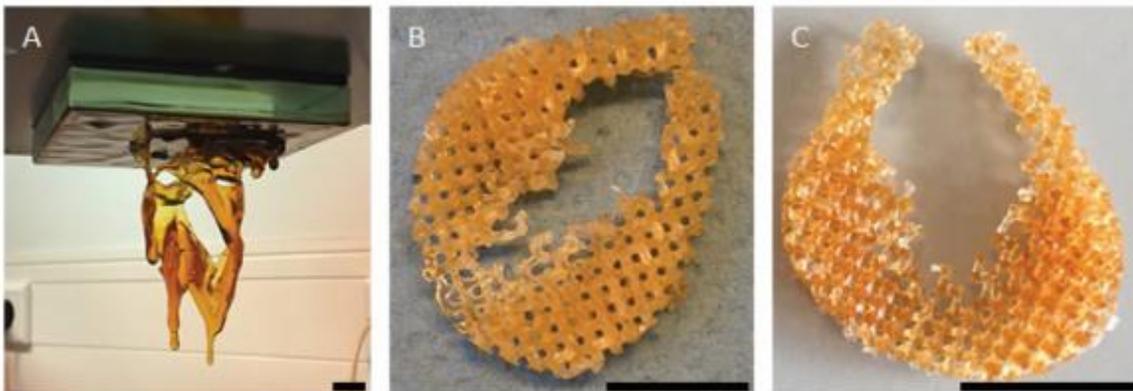
Esquema de funcionamiento de la fuerza de separación durante la construcción de andamios porosos



La fuerza presente en el proceso limita el tamaño de la estructura, la confiabilidad de la impresión, la velocidad del proceso y el ciclo de vida de la base de la tina. Una de las mayores desventajas que produce esta fuerza es que si es demasiado grande conduce a muchos defectos de fabricación (agujeros en las piezas impresas, la adhesión de capas curadas en una superficie restringida, capas separadas, piezas defectuosas y superficie restringida rota) (Pan et al., 2017).

Figura 10

Ilustración de los intentos de preparar un implante de menisco poroso mediante estereolitografía. Barra de escala = 1 cm. A) Una impresión error de gyroid no extraído. B) Gyroid deformado extraído. C) Gyroid en buen estado



Nota: (Bochove et al., 2016)

Ingeniería biomédica

Es la rama de la ingeniería que introduce la tecnología al campo de la medicina, dedicada al diseño y construcción de equipos médicos, prótesis, dispositivos médicos, dispositivos de diagnóstico (imagenología médica) y de terapia. También interviene en la gestión o

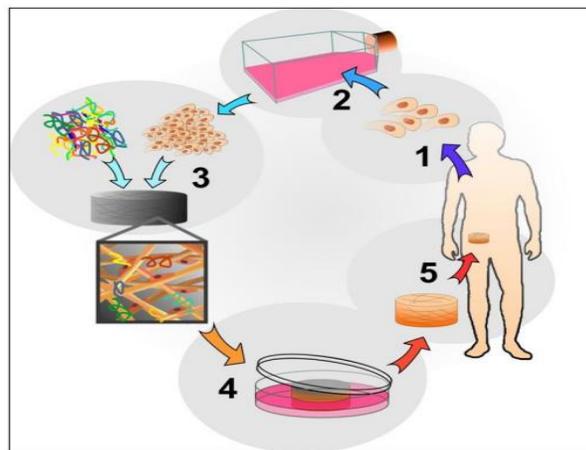
administración de los recursos técnicos ligados a un sistema de hospitales. Las actividades que incluyen van desde la aplicación de métodos matemáticos y la ciencia experimental hasta el desarrollo tecnológico y las aplicaciones clínica (Gismondi Glave, 2010).

Ingeniería de tejidos

Es la aplicación de principios y métodos de la ingeniería y de las ciencias biológicas, para el entendimiento de la relación estructura – función en tejidos, y el desarrollo de sustitutos biológicos que restauren, mantengan o mejoren la función de dichos tejidos (Lorenti, 2017).

Figura 11

Esquema de la ingeniería de tejidos



Nota: Las células madre son extraídas (1) y cultivadas (2), el uso de matrices tridimensionales, así como moléculas de señalización (factores de crecimiento) facilita su crecimiento y especialización (3). El cultivo puede realizarse "in vitro" (4). El objetivo final en cualquier caso será el implante para la sustitución del tejido dañado (5). (Oleaga, 2015)

Biomecatrónica

La aplicación de la mecatrónica para resolver problemas de sistemas biológicos es llamada biomecatrónica, la cual se encarga del desarrollo de sistemas de simuladores quirúrgicos,

nuevos tipos de prótesis, control de posición de instrumental médico(Barreiro Elorza & Ruiz-Altisent, 2002).

Aplicaciones de las estructuras porosas en la ingeniería de tejidos

- Reconstrucción de tejido óseo.
- Órganos artificiales.
- Tejido muscular.
- Tejido epidérmico.

Evolución de la ingeniería de tejidos

La aparición de la ingeniería de tejidos está estrechamente conectado al desarrollo de la medicina clínica (prótesis, cirugía reconstructiva, trasplantes, microcirugía) y la biología (biología celular, bioquímica, genética). Los trasplantes de ciertas partes del cuerpo humano por dispositivos fue uno de los primeros casos de uso de biomateriales para la medicina reconstructiva (Meyer et al., 2009).

Los primeros reemplazos de piezas dentales se implementaron en el periodo de Galileo. Se encontraron varios cuerpos que poseían implantes metálicos en la mandíbula. Un trabajo de mejor calidad fue descrito por Ambroise Pare en su trabajo "Dix Livres de la Chirurgie", donde describe medidas para la reconstrucción de dientes, narices y otras partes del cuerpo. En el siglo XVIII un método común fue el trasplante de dientes entre humanos que fue estudiado por John Hunter quién además realizó un estudio de trasplantes en animales y sentó las bases para los actuales trasplantes.

Durante los primeros años de desarrollo de biomateriales, llamada primera generación Hench define en su artículo de 1980, biomateriales, como "para lograr una combinación adecuada de propiedades físicas que coincidan con las del tejido reemplazado con una respuesta tóxica

mínima en el huésped", debido a la constante evolución de la comprensión de cómo funcionan y se forman los tejidos, las características biomédicas que intentan producir también han evolucionado. La generación actual de biomateriales para ingeniería de tejidos pretende influir en el comportamiento celular a través de diversos medios. Estos incluyen la adaptación de los aspectos específicos del diseño del andamio, la elección del material o la arquitectura del andamio, las terapias basadas en células y la ingeniería de tejidos basada en factores de éxito en los tejidos de reemplazo (Pallua & Suschek, 2011).

Capítulo III

Diseño Experimental

Planificación del proceso

Figura 12

Diagrama de flujo del proceso de construcción de estructuras porosa en DLM parte 1.

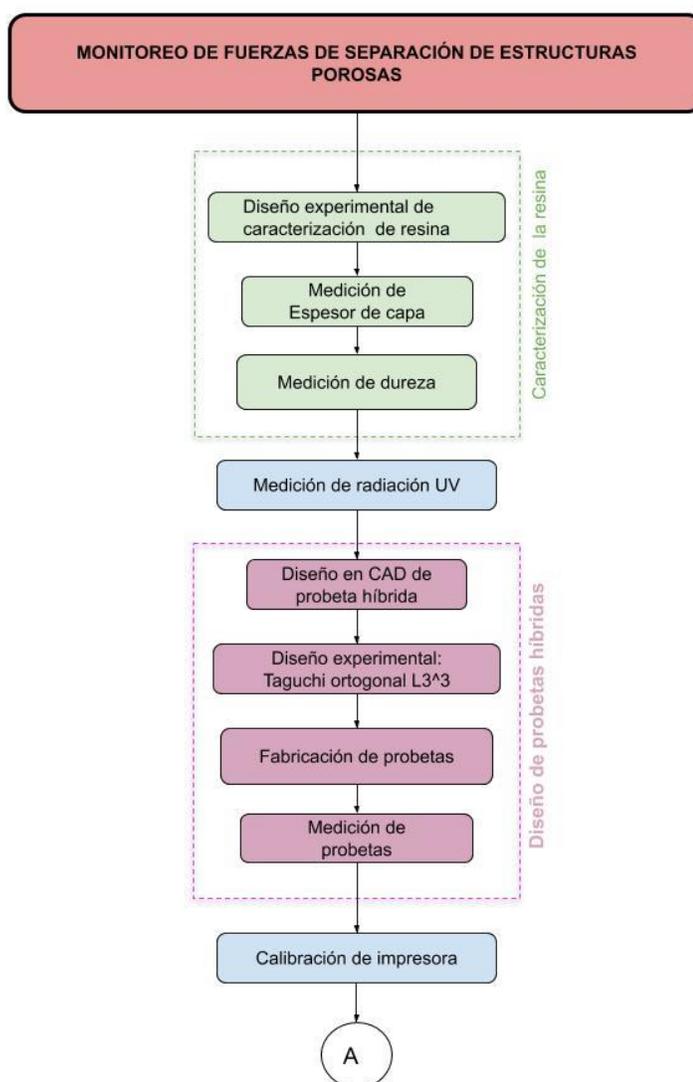
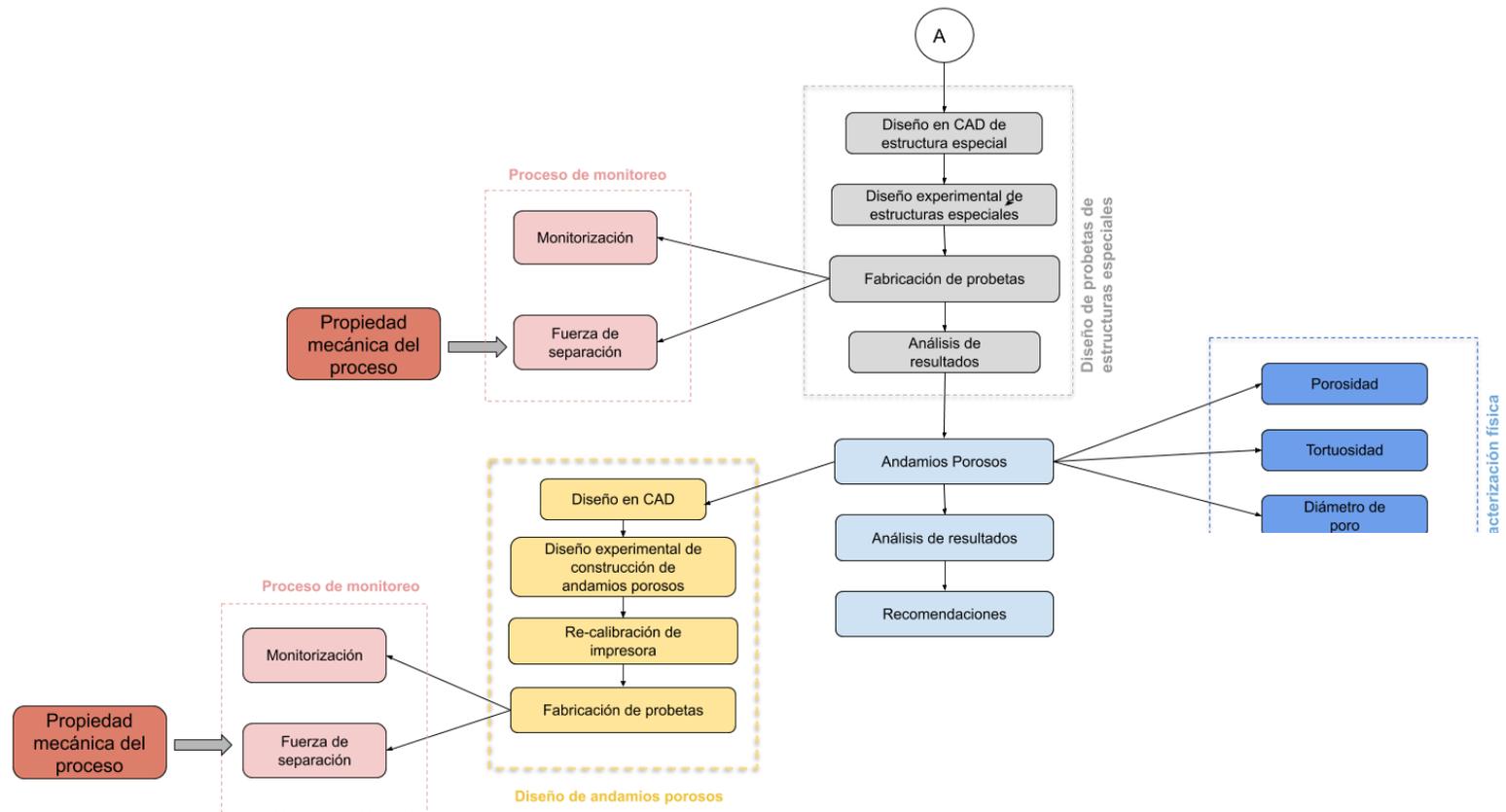


Figura 13

Diagrama de flujo del proceso de construcción de estructuras porosa en DLM parte 2



Objetivo del proceso

Definición de la meta

El proceso de impresión de estructuras porosas tiene como objetivo la obtención de datos de fuerzas de separación ejercidas durante el proceso de impresión y determinar tiempos y velocidades aptas para la impresión de las piezas sin producir la ruptura de las mismas.

Caracterización de la resina

Para el inicio del estudio de la impresión de andamios porosos es necesario saber las características del material con el que se va a trabajar, para lo cual se realizó las pruebas de curado, dureza y medición de radiación UV-A, obteniendo como resultado la influencia de estas variables en la impresión de estructuras porosas.

La resina a caracterizar es de la marca SparkMarket (LCD-T), cuyas características de mercado se las puede encontrar en la Tabla 2 y para mayor información se puede encontrar en el Anexo G.

Tabla 2

Características de la Resina

Longitud de onda [nm]	Elongación [%]	Color	Terminación de producto	Descripción
355-405	115	Transparente	Duro	Tipo ABS

Diseño Experimental

Para la parametrización de la impresora DLM es necesario saber las características que la resina toma durante la exposición de radiación en la impresora DLM. Los parámetros editables del sistema usado (NanoDLP) son la velocidad de elevación, el tiempo de curado y el espesor de capa (NanoDLP - Software for SLS/SLA/DLP 3D Printers, 2012).

Velocidad de Avance: La rapidez con que se desplaza la base de impresión medido en [$\mu\text{m}/\text{ms}$].

Tiempo de curado: tiempo de exposición de la resina a la radiación UV-A.

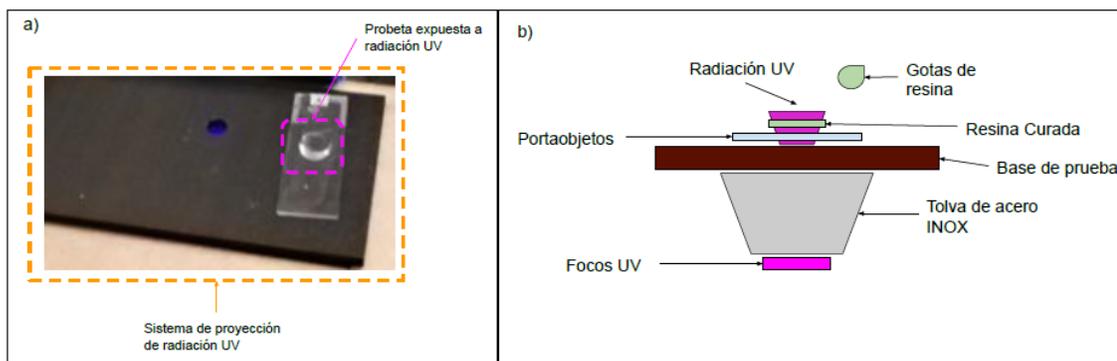
Espesor de capa: el ancho de capa que se mantiene durante la impresión DLM.

Para la parametrización de estas variables se realizaron probetas circulares de diámetro de 10 [mm] cuyo espesor variaba de acuerdo al tiempo de exposición de la resina a la radiación UV-A, los espesores de capa de la resina se los obtuvieron por medio de un diseño experimental tipo Taguchi Ortogonal L_{27} de 2 factores (Tiempo de exposición y voltaje de los LEDs UV-A), 3 niveles y 3 repeticiones, al que se lo llamará a partir de aquí Taguchi Re (los detalles se encuentran en el anexo A). En la preparación de la prueba se hace uso de una pipeta de 3 [ml] y en medio de un portaobjetos se vierte de 6 a 7 gotas de resina, este método es llamado “test de curado” (Mott et al., 2016).

Para la variación de irradiancia se utilizó una fuente variable que se conectó a los leds, la cual permitía la variación de voltaje dando como resultado las distintas medidas de irradiancia.

Figura 14

Estructura para la obtención de espesor de curado



Materiales y equipos a utilizar

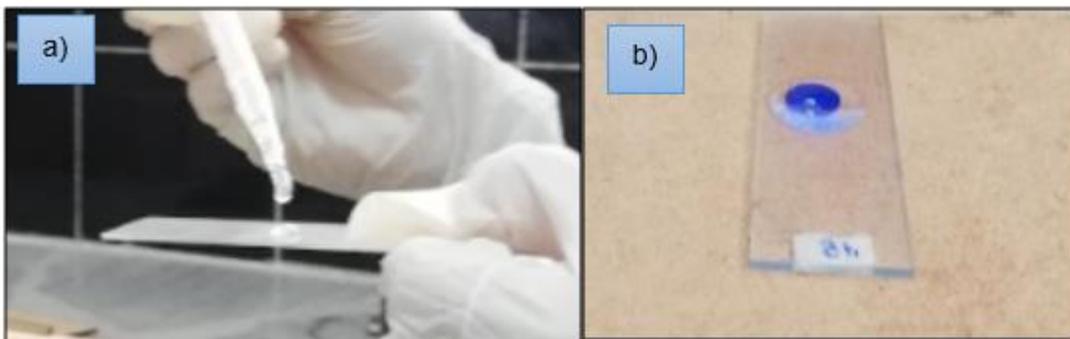
- Impresora DLM
- Resina SPARKMaker LDC-T (Datasheet, Anexo G)
- Portaobjetos
- Pipeta de 3 [ml]
- Calibrador digital (Truper, Mexico)

Espesor de capa

Se hizo uso de 27 portaobjetos distintos los cuales constaban con el mismo número de gotas, pero se los iba exponiendo de acuerdo a los parámetros del Taguchi Re. En la Figura 15 se muestra el procedimiento de la realización de las probetas.

Figura 15

a) Aplicación de la resina en el portaobjetos. b) Realización de la prueba de curado



Una vez expuesta la resina en el sistema de proyección, esta forma una capa, la cual se midió por medio del uso del calibrador y dos portaobjetos, en la Figura 16 se muestra un esquema del posicionamiento de los portaobjetos y de la resina para hacer la medición de espesor de capa. Siendo el espesor de capa igual a:

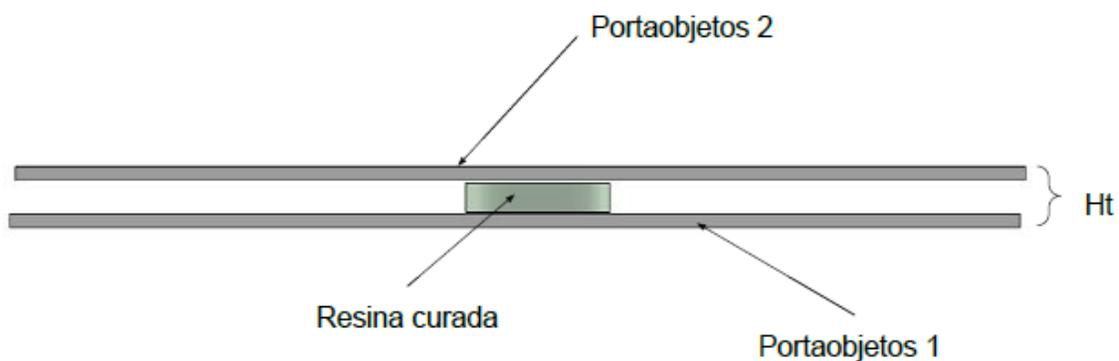
Ecuación 5: Espesor de capa

$$Esc = H_t - EsP1 - EsP2$$

Esc	Espesor de capa
H_t	Altura total
$EsP1$	Espesor de portaobjetos 1
$EsP2$	Espesor de portaobjetos 2

Figura 16

Esquema de posicionamiento de portaobjetos para la medición de espesor de capa



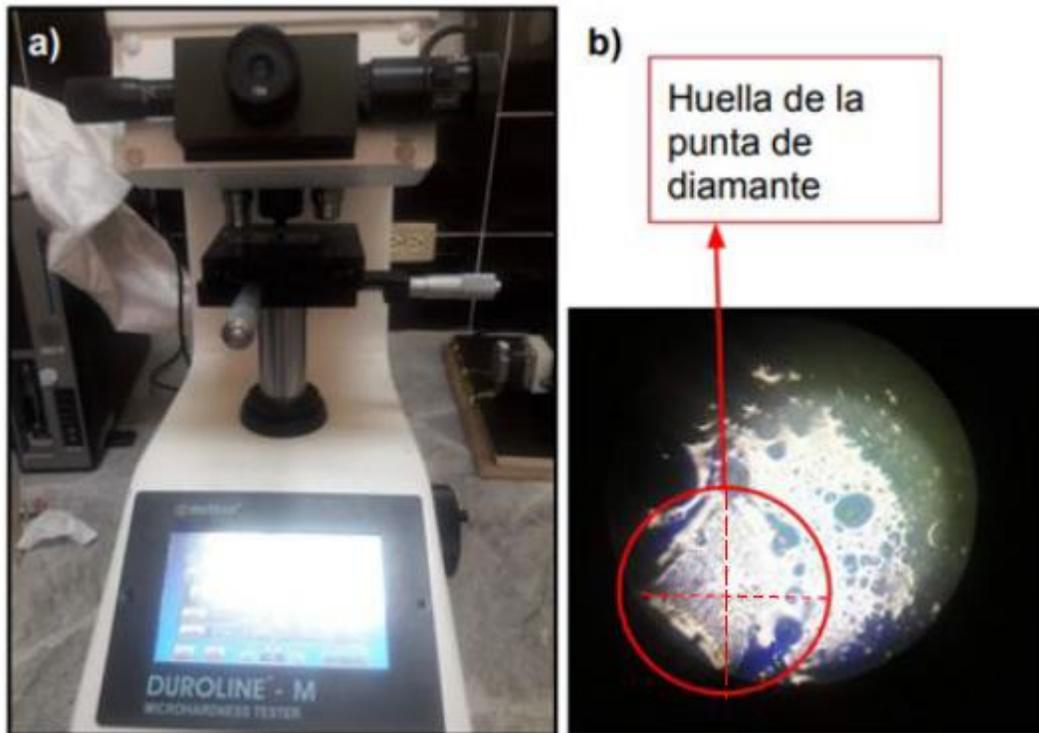
Una vez obtenidas las probetas se prosigue con la medición del espesor de la capa y su análisis

Medición de dureza Vickers

La medición de dureza se la realizó en la maquina Metkon (Duroline-M, Turquía) (véase en la Figura 17 -a). Las probetas que se sometieron a esta prueba fueron las probetas obtenidas de la medición de espesor de capa.

Figura 17

a) Durómetro Metkon. b) Vista de probeta desde el durómetro



Medición de radiación UV-A

La medición de la radiación UV-A se la realizó por medio del sensor General Tools (UV513AB Digital Meter, Estados Unidos) a diferentes distancias de la luz UV-A. En la Figura 19 se observa el sistema utilizado para la medición de radiación.

Figura 18

Esquema para la medición de irradiancia

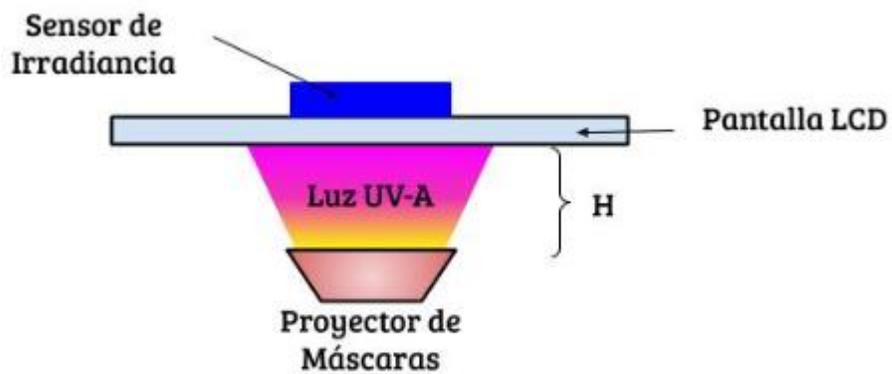
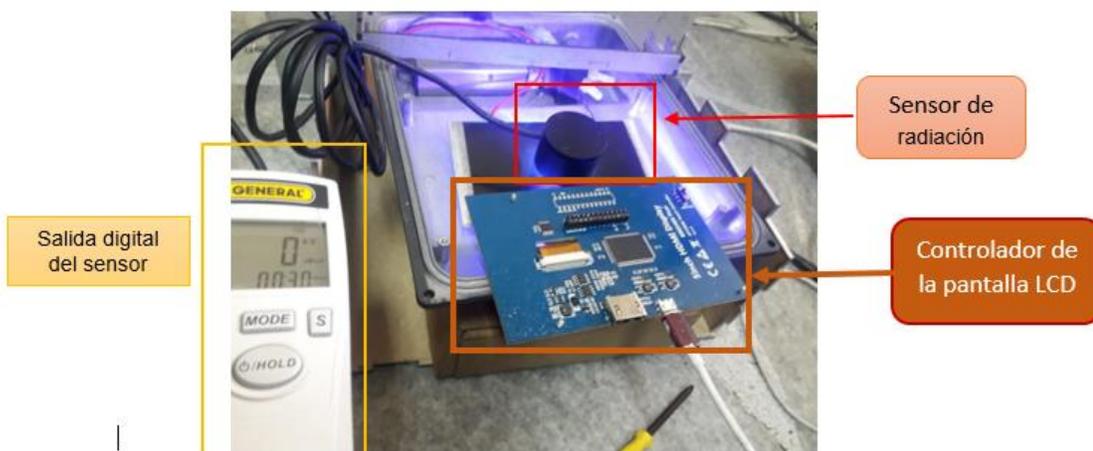


Figura 19

Sistema de medición de radiación UV-A



La medición de la radiación se la hizo con y sin la pantalla LCD a diferentes alturas.

Para la variación de irradiancia se hizo uso de una fuente de voltaje variable con una corriente de 2 [A].

Diseño de Probetas tipo matriz

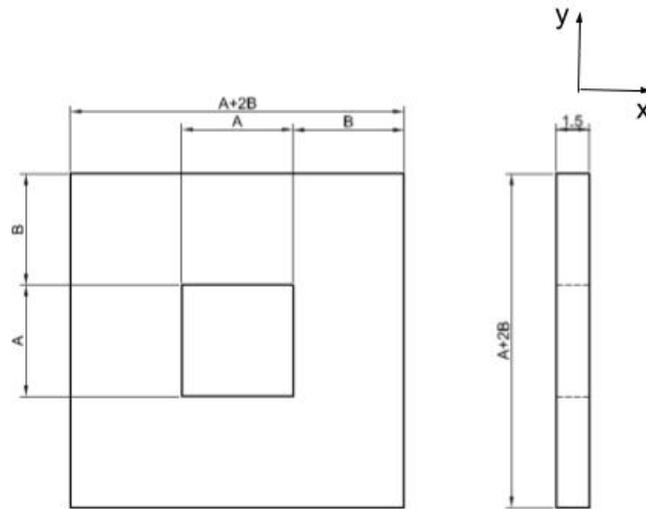
La impresora DLM se encontraba calibrada y caracterizada inicialmente para imprimir estructuras completamente sólidas y de un tamaño mayor al de 2 [mm] de diámetro, por lo que imprimir estructuras porosas con la calibración inicial era imposible, con lo que se procedió a calibrar las velocidades de elevación, tiempos de curación y sobrecurado de las capas, además de que existía un desvío en los ejes para estructuras menores a 10 [mm] de diámetro

Diseño CAD y experimental

Se realizó una probeta tipo matriz la cual permitió la calibración de los ejes x y y , esta probeta fue un cuadrado que contenía un vaciado cuadrado cuyas medidas se las varió de acuerdo al diseño experimental Taguchi ortogonal que constaba de 3 factores (a , b y velocidad de elevación) y 3 niveles (2, 2,5 y 3 [mm], la velocidad de elevación: 50, 100 y 150 [$\mu\text{m/s}$]), a partir de aquí este diseño se lo llamará Taguchi Hi (Anexo B). El tiempo de curación utilizado fue de 25 [s] y una irradiancia de 53 [$\mu\text{W/cm}^2$].

Figura 20

Diseño de probeta para la calibración de escala de la impresora DLM



].

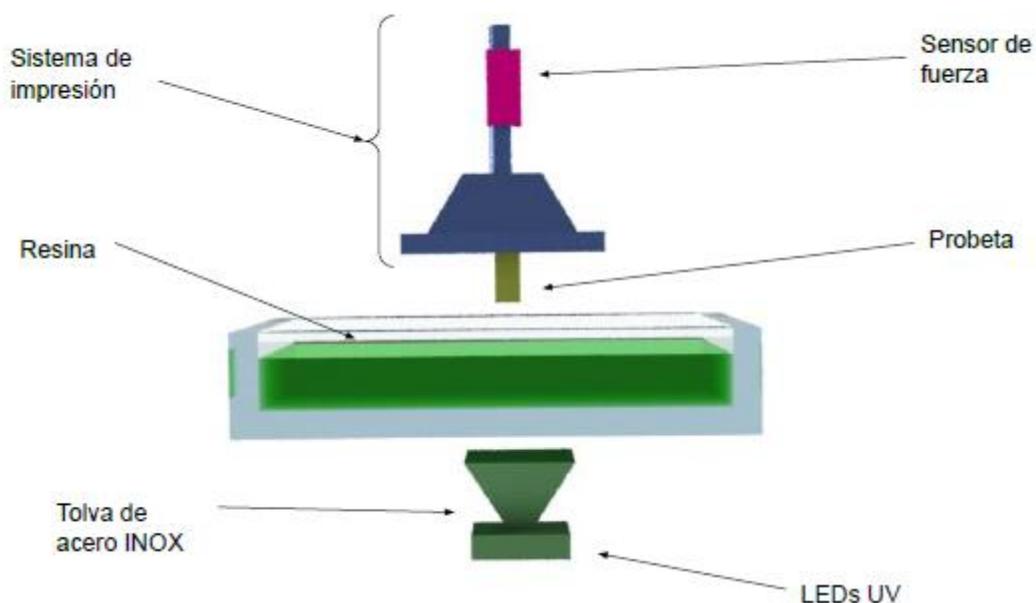
Figura 20 de A y B son las variables de longitud que se combinaron de acuerdo al diseño experimental de Taguchi Hi.

Fabricación y medición de probetas

La manufactura de las probetas se la hizo en la impresora DLM con un espesor de capa de 150 [μm] y se varió la velocidad de elevación de acuerdo al Taguchi Hi. En la Figura 21 se puede observar el sistema de impresión que se usó para la impresión de probetas tipo matriz.

Figura 21

Sistema de impresión DLM



La medición de las probetas se la realizó una vez impresas y se lo hizo haciendo uso de un calibrador digital.

Diseño de estructuras para la caracterización de resina en verde

Los parámetros de que se varían en el programa NanoDLP son la velocidad de elevación y tiempo de curación, para la obtención óptima de estos datos fue necesario la impresión de estructuras con un diámetro variable. En la Tabla 3 se puede observar los parámetros de impresión estables durante toda la experimentación.

Tabla 3

Parámetros constantes durante la experimentación.

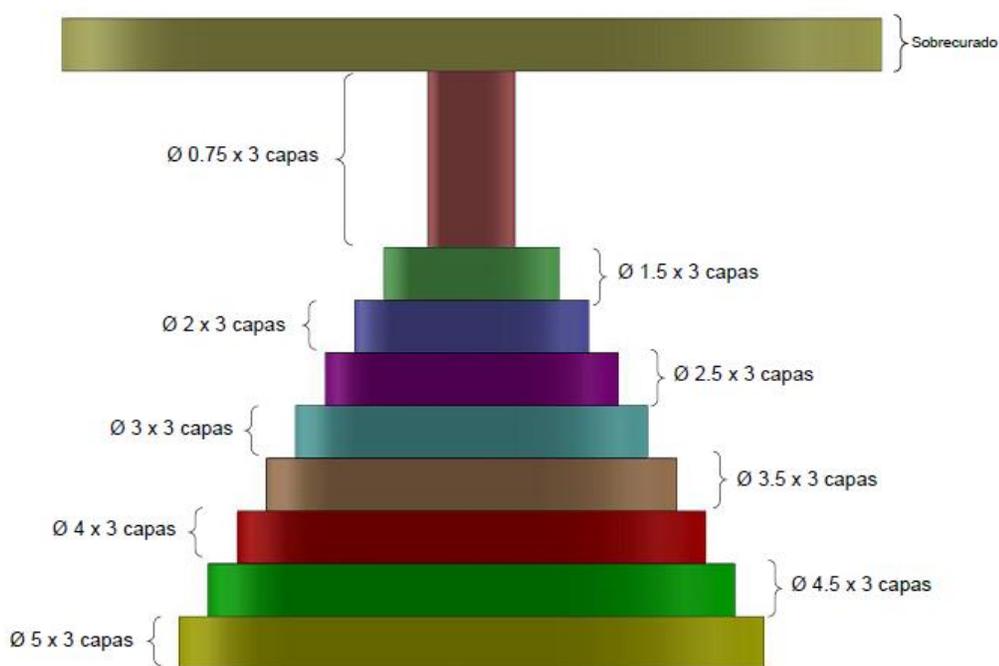
Espesor de capa	Tiempo de sobrecurado	Tiempo de suspensión
150 [μm]	50 [s]	5 [s]

Diseño en CAD

El diseño de esta estructura para caracterización de resistencia en verde fue diseñado para obtener una ruptura en el diámetro menor y obtener fuerzas de separación mayores en cada cambio de sección. La estructura a que se realizó se la puede observar en la Figura 22.

Figura 22

Estructura Experimental.



Nota: (Lara Padilla et al., 2020)

Diseño experimental de la estructura para la caracterización de resistencia en verde

En la estructura para caracterización de resistencia en verde cuenta con 9 cambios de secciones de áreas yendo de un área menor a una mayor sin contar con las tres primeras capas de sobrecurado, que son la que no permiten que la pieza se desprenda de la base de impresión

durante el proceso de fabricación. Cada sección cuenta con tres capas a excepción de la sección cuyo diámetro de 0.75 [mm] que cuenta con 10 capas de impresión.

Para la manufactura de estas piezas se realizó un Taguchi ortogonal L27 de 2 factores, 3 niveles y 3 repeticiones, a partir de aquí se lo llamará Taguchi Es. En la Tabla 4 se muestra de manera más específica los valores y variables con las que se trabajó.

Tabla 4.

Factores y niveles del Taguchi Es

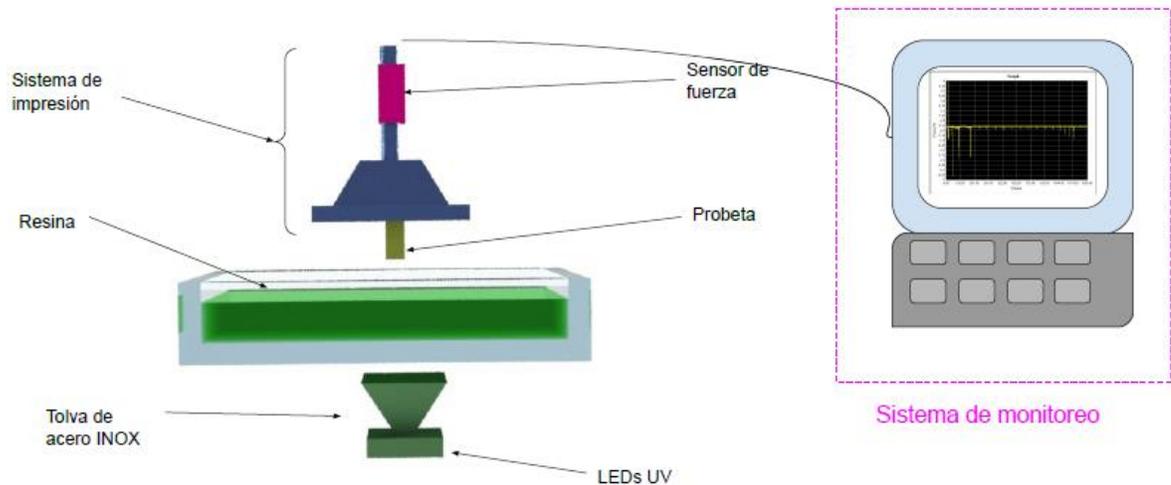
Factores		Niveles	
Velocidad de elevación	40 [$\mu\text{m/s}$]	50 [$\mu\text{m/s}$]	60 [$\mu\text{m/s}$]
Tiempo de curado	20 [s]	25 [s]	30 [s]

Fabricación de probetas

La fabricación de las estructuras para caracterización de resistencia en verde se la hizo en la impresora DLM y además se realizó el monitoreo de las fuerzas de separación en una laptop haciendo uso del programa EDMS (Nidec Shimpo Corporation, Japón) que se enlazó al sensor de fuerza FG-3006 (Nidec Shimpo Corporation, Japón), permitiendo tener las fuerzas de separación durante el proceso de fabricación. En la Figura 23 se puede observar el esquema de impresión y monitoreo que se tuvo durante la experimentación.

Figura 23

Esquema de impresión y monitoreo de estructuras para caracterización de resistencia en verde.



Diseño de estructura porosa

La estructura que se imprimió fue un andamio poroso TPMS que cumple con el lineamiento de la Ecuación 2 siendo esta:

Ecuación 6: TPMS a Imprimir de un piso.

$$\max(x^2 - 2, \max(y^2 - 2, \max(\cos 2x + \cos 2y + \cos 2z - 0, z^2 - 2)))$$

Ecuación 7: TPMS a Imprimir de tres pisos.

$$\max(x^2 - 2, \max(y^2 - 2, \max(\cos 2x + \cos 2y + \cos 2z - 0, z^2 - 2)))$$

La Ecuación 6 y la Ecuación 7 fueron modeladas en el programa Mathmod (Abderrahman Taha, Canadá) y luego procesadas en el programa Meshlab (ISTI-CNR, Italia) para las distintas impresiones, cuyos parámetros se encuentran especificados en la Tabla 5.

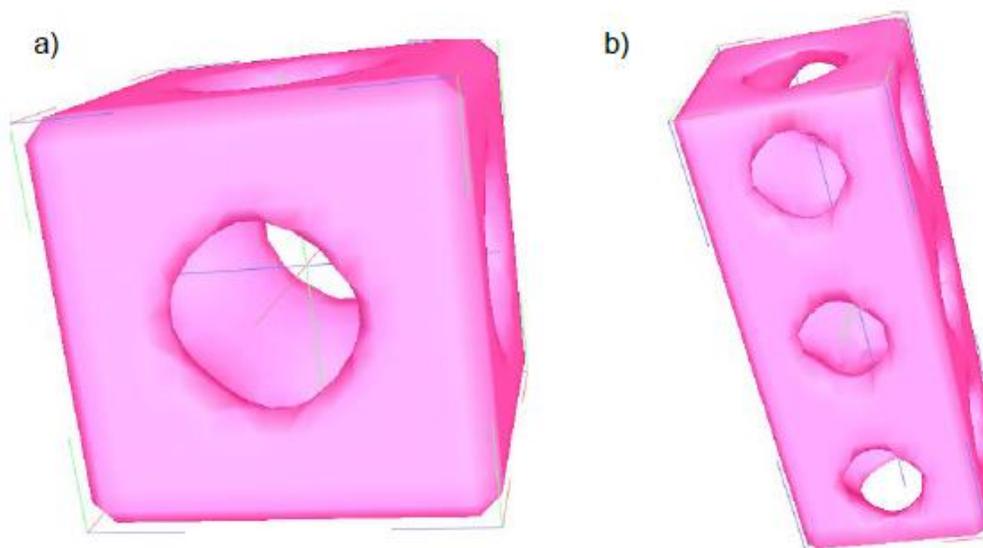
Tabla 5*Parámetros de impresión*

Tiempo de sobrecurado [s]	Tiempo de curado [s]	Espesor de capa [μm]	Velocidad de elevación [$\mu\text{m/s}$]	Irradiancia [$\mu\text{W/cm}^2$]
50	30	150	50	53

En la Figura 24 se observa el CAD de los andamios porosos que se imprimieron para el proyecto.

Figura 24

a) Andamio TPMS de un piso. b) Andamio TPMS de tres pisos



Diseño experimental de construcción de andamios

Para la construcción del diseño experimental se determinó como variables el número de pisos y la longitud de cada uno de estos pisos, usándose un Taguchi mixto $L18$ donde los niveles son 1 y 3 pisos y la longitud de lado son 3, 4 y 5 [mm]. De ahora en adelante este experimento se lo llamará Taguchi P

Monitoreo de impresiones y sensor

El monitoreo durante la impresión de los andamios porosos se lo hizo por medio del programa EDMS, el cual obtiene los valores marcados del sensor de fuerza FG-3006 y permite la exportación de los datos y la gráfica de Fuerza versus Tiempo (Figura 43). Estos valores de fuerzas obtenidos son los valores de la fuerza de separación producida durante el proceso de fabricación de las diferentes estructuras.

Este sistema de monitoreo permitió detectar cuando un andamio o estructura se rompía (cuando los valores eran igual a 0 [N] después de una fuerza mayor a 0.3 [N]), permitiendo adquirir la fuerza máxima de separación en cada pieza rota.

Análisis de datos

Las fuerzas de separación obtenidas durante el proceso de calibración e impresión de estructuras para caracterización de resistencia en verde no sobrepasaban a 4 [N] por lo que se encontraban dentro del rango de medición del sensor de fuerza, además admitió una calibración de mayor calidad, lo que permitió la impresión de andamios porosos sin que estos se rompieran durante la impresión.

Capítulo IV

Análisis y discusión de resultados

Resultados de la caracterización del material

Caracterización del material

Dureza Vickers

La dureza fue medida en las probetas obtenidas para la medición del espesor de capa. En la Figura 25 se muestra la tendencia de resultados en la que, a mayor tiempo de exposición, mayor es la dureza del material, y además a mayor irradiancia mayor dureza. Dando como resultado final que los valores más altos se encuentran cuando la resina se expone a una irradiancia producida por un voltaje de 12 [V] y un tiempo de exposición igual a 20 [s].

Figura 25

Dureza del material vs tiempo de exposición a la radiación.

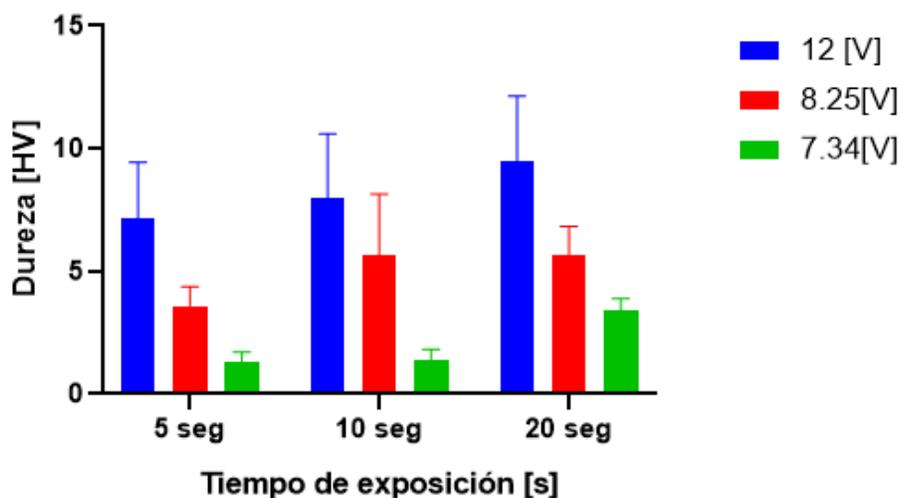
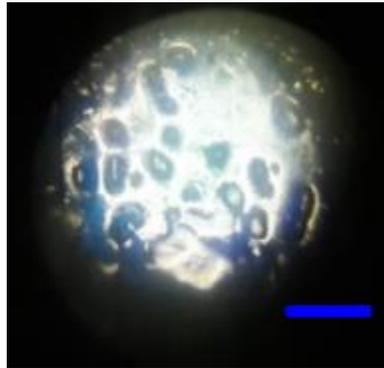


Figura 26

Resina fotocurada a 20 [s] y 20 [V]. Escala=1 [μm].



En la Figura 26 se observa la estructura de la resina fotocurada bajo en el microscopio, en la cual se puede observar pequeños poros. Para la profundización del comportamiento de la resina a las diferentes medidas de irradiancia, será necesario un estudio que profundice en la micrografía de resinas fotocurables

Debido al precio excesivo de las resinas para impresión por DLM, es poco factible elaborar ensayos mecánicos cuyo consumo de material es elevado como probetas ASTM-D638. Por lo cual se buscan pruebas que demanden poco contenido de resina y que puedan brindar resultados confiables. Establecer una relación entre propiedades de medición rápida y que no usen demasiado material como por ejemplo ensayos de dureza y ensayos de corte por punzonado vienen siendo alternativas aplicadas al desarrollo de nuevos materiales. Por ejemplo, Lin y Zhao proponen un método para relacionar la dureza de piezas impresas mediante DLM con esfuerzos a la tensión (Yang et al., 2019). Sagar 2014, analizó la relación entre pruebas de micropunch y otras de resistencia mecánica (Sagar, 2014).

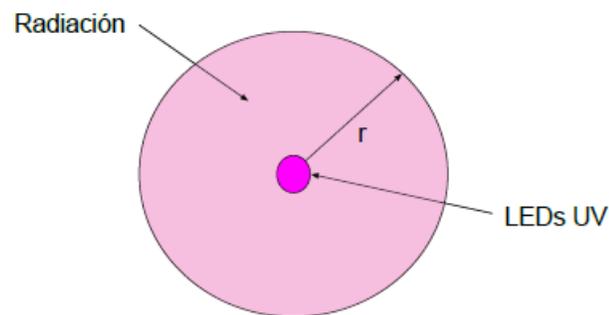
Radiación UV

La medición de radiación se la hizo a tres alturas diferentes, tratando de disminuir la potencia de salida a los LEDs UV-A.

En la Figura 27 se muestra el esquema de cómo distribuye la radiación en el sistema de impresión DLM. La irradiancia de la radiación UV-A es directamente proporcional a $\frac{1}{r^2}$, donde r es el radio de la esfera que forma la radiación (Matveev, 1988).

Figura 27

Esquema de radiación UV



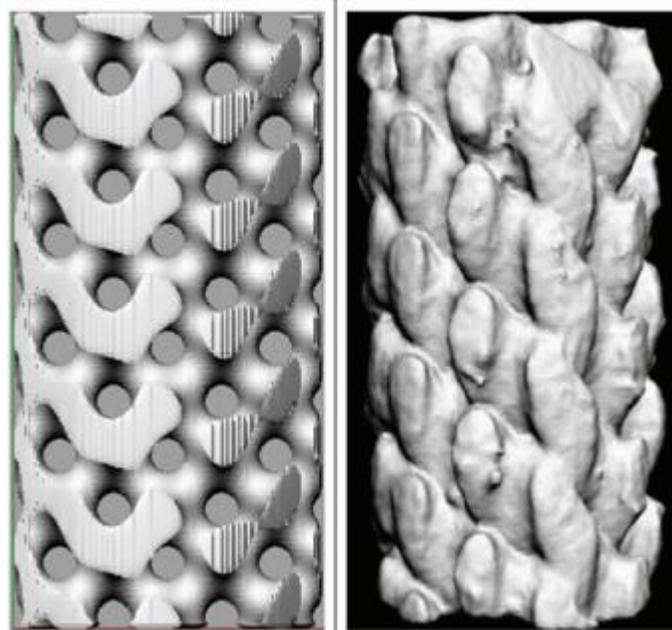
En la Figura 29 se observa que a mayor altura menor es la irradiancia, mostrando que a una altura de 63 [mm] la radiación es de 53 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] en cambio para una altura de 3 [mm] la irradiancia máxima obtenida es de 906 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] cumpliendo con la proporción anteriormente planteada.

En el desarrollo de nuevas tecnologías de impresión DLM y de nuevas resinas fotocurables, es importante la caracterización de la irradiancia porque se requiere conocer la cantidad exacta de energía para entrar a la etapa de gelación. Demasiada irradiancia produce excesiva temperatura sobre la resina y a más de provocar distorsiones en la pieza impresa, produce propiedades físicas y mecánicas no aptas para aplicaciones estructurales. Por otra parte,

una irradiancia muy baja aumenta los tiempos necesarios para el endurecimiento de la resina o en algunos casos no se llega a endurecer. Jacobs en su libro de Rapid prototyping fundamentals o Stereolithography presenta una energía de $5,6 \text{ [mJ/cm}^2\text{]}$ para la fabricación de estructuras en estereolitografía (Jacobs, 1992).

Figura 28

Comparación del resultado final de una estructura porosa diseñada en CAD (izquierda) y una estructura impresa con una irradiancia alta (derecha).

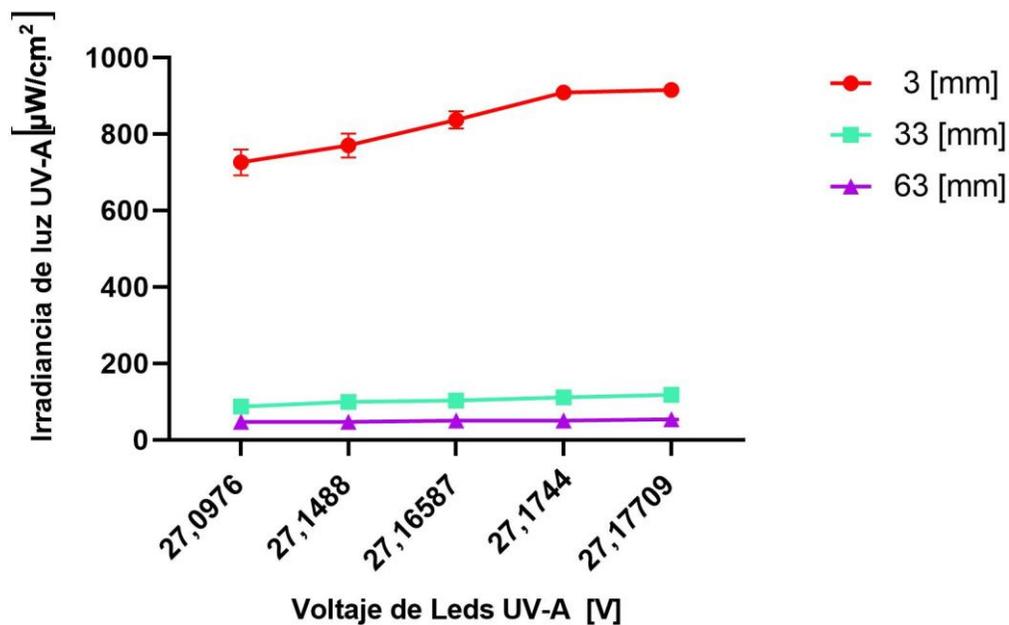


Nota: (Bochove et al., 2016)

En la Figura 28 se muestra el diseño en CAD de una estructura porosa del lado izquierdo y lo que llegaría a pasar si la irradiancia es muy alta durante la fabricación. Teniendo como resultado la curación de la resina en los poros.

Figura 29

Medición de radiación UV-A



Como se ve en la Figura 29 la irradiancia a 63 [mm] de altura es igual a $53 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, siendo este el valor que se mantendrá para las siguientes impresiones. Resinas biocompatibles como el fumarato de polipropileno se imprimen a $320 \text{ mW}/\text{cm}^2$ y Mott imprime estructuras porosas a una irradiancia igual a $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Mott et al., 2016).

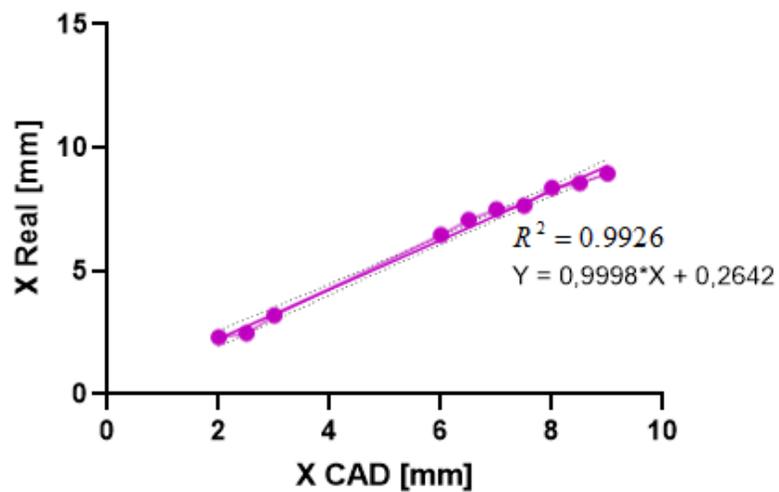
Metrología y control de calidad de estructuras impresas tipo matriz

Es importante fijar parámetros específicos para estructuras porosas debido a que no se puede usar los mismos parámetros por defecto para la fabricación de los andamios porosos

En la Figura 20 muestra la estructura con la que se trabajó en esta sección, de la cual se adquirió las medidas de los ejes x y y que arrojaron los siguientes resultados.

Figura 30

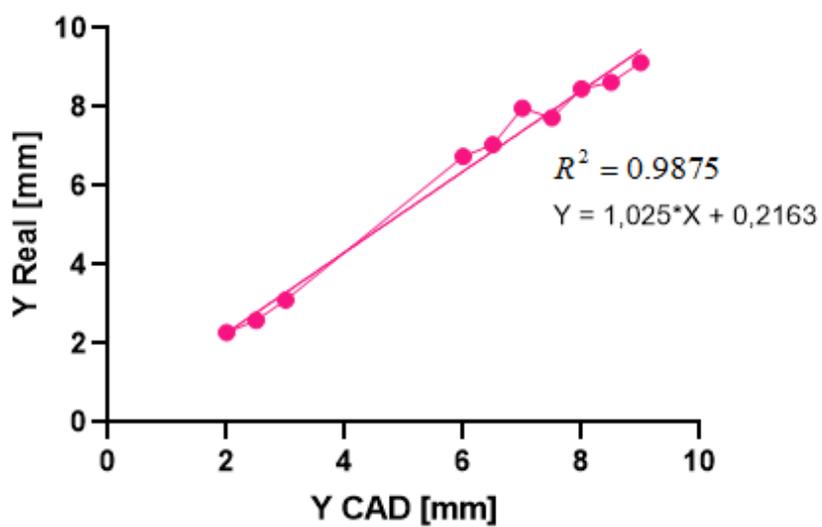
Resultados de impresión en el eje X



Nota: X Real es la medida en el eje x en la probeta física y X CAD es la medida en el eje x en el diseño computacional de la probeta

Figura 31

Resultados de calibración en el eje Y



Nota: Y Real es la medida en el eje y en la probeta física y Y CAD es la medida en el eje y en el diseño computacional de la probeta.

Al prestar atención a la Figura 30 y Figura 31, se tiene que existe cierta desviación en las medidas, obteniendo las ecuaciones de escala de:

Ecuación 8: Ecuación de escala en el eje x

$$x_{real} = 0.9994x + 0.2673$$

Ecuación 9: Ecuación de escala en el eje y

$$y_{real} = 1.0179y + 0.2403$$

Las ecuaciones de escala de x y y permitirán una exactitud más alta en los valores de longitudes de las estructuras, logrando la impresión de objetos de tamaños pequeños (menores a 5 [mm]). Para la imposición de estos parámetros en la impresión se hizo uso de Meshlab, en la cual se escalaba el objeto de acuerdo a las ecuaciones adquiridas en la experimentación.

Dado que la impresión 3D se utiliza cada vez más en aplicaciones industriales de alto rendimiento, la tecnología debe ofrecer piezas de alta calidad de forma constante y fiable con las propiedades necesarias para satisfacer las aplicaciones más exigentes (Chee et al., 2017).

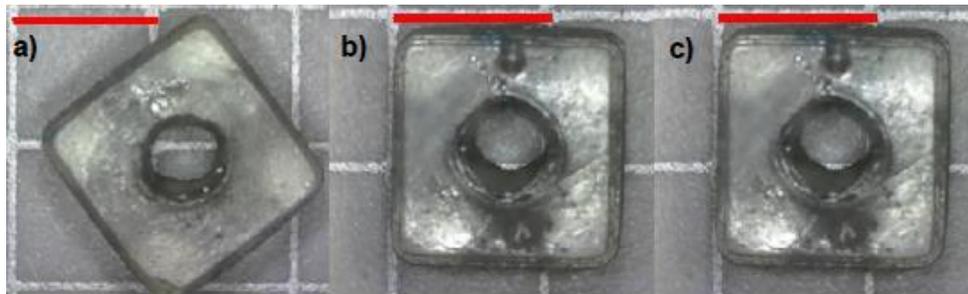
La metrología a en el control de calidad de partes fabricadas por DLM permite la determinar la deformación producida por la fuerza de separación obtenida durante la impresión de la estructura.

Los parámetros de impresión para la exploración de otras velocidades se los presenta en la Tabla 5 y la pieza a imprimir fue la estructura mostrada en la Figura 20 en donde $A=3$ [mm] y $B=3$ [mm].

La variación de velocidades dio como resultado que a mayor velocidad menor definición de la estructura se obtenía. Esto se lo puede observar de mejor manera en la Figura 32.

Figura 32

Estructuras impresas a diferentes velocidades de avance, V_a . a) $V_a = 50$ [$\mu\text{m/s}$]. b) $V_a = 100$ [$\mu\text{m/s}$]. c) $V_a = 150$ [$\mu\text{m/s}$]. Escala = 5 [mm]



La intención de probar con otras velocidades tiene como objetivo mejorar los tiempos de producción sin disminuir la calidad de la pieza final. La producción de una pieza de 3 [cm] de altura en la impresora DLM con un tiempo de curación de 30 [s] y una velocidad de elevación de 60 [$\mu\text{m/s}$] es de 1.6 [h] sin tomar en cuenta los tiempos de elevación y escurrido.

Impresión de las estructuras para caracterización de resistencia en verde

El diseño de la Figura 22 está delineado para obtener una rotura en el diámetro menor durante la impresión de la misma, este procedimiento se lo realizó para adquirir las distintas fuerzas de separación a distintas velocidades de avance y tiempos de curación, cuyos resultados permitirán un mejor corolario en la impresión de datos.

Tabla 6*Fuerza Máxima de separación*

Velocidad de elevación [$\mu\text{m/s}$]	t=20 [s]	t=25 [s]	t=30 [s]
40	1,2	1,6	1,7
50	2,1	2,5	2,0
60	2.4	2,7	3,7

t: tiempo de curado

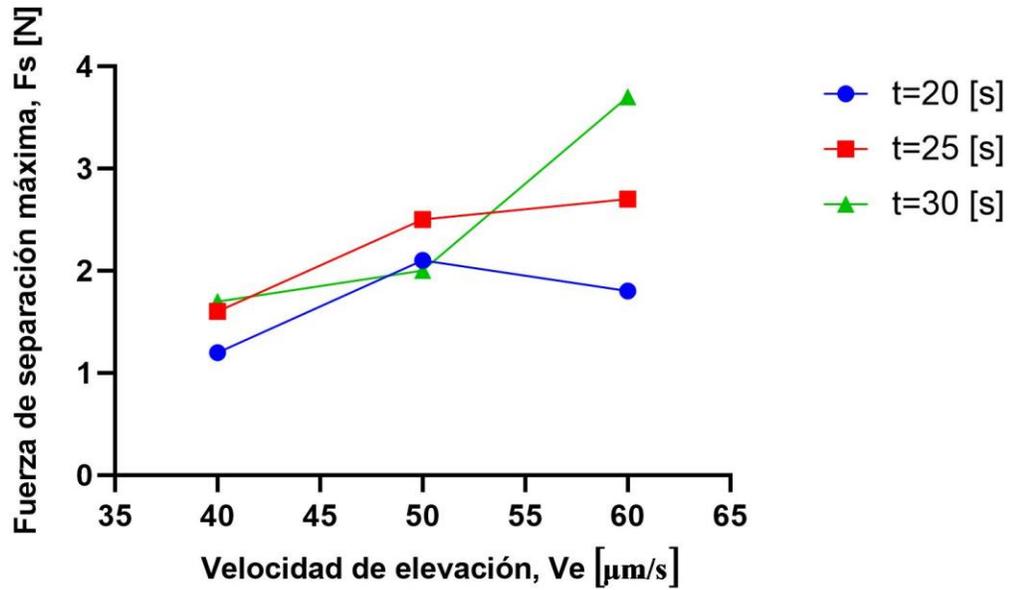
En la

Tabla 6 se muestra las fuerzas máximas de separación a diferentes velocidades de avance y tiempos de curación teniendo como resultado la Figura 33.

Figura 33

Velocidad de elevación vs. fuerza máxima de separación a 20, 25 y 30 [s] de tiempo de curación

(t).



De la Figura 33 se obtiene que en los tiempos de curación de 25 y 30 [s] a mayor velocidad de elevación mayor es la fuerza de separación, sin embargo con un tiempo de 20 [s] esta norma no se cumple. Si nos basamos en la siguiente ecuación cuando el área de análisis es circular:

Ecuación 10: Fuerza de separación

$$F_s = \frac{3\pi\mu V}{2h^3} R^4$$

F_s	fuerza de separación
μ	viscosidad de la resina
V	velocidad de elevación
h	espesor de capa
R	radio de la superficie

Nota: (Pan et al., 2017)

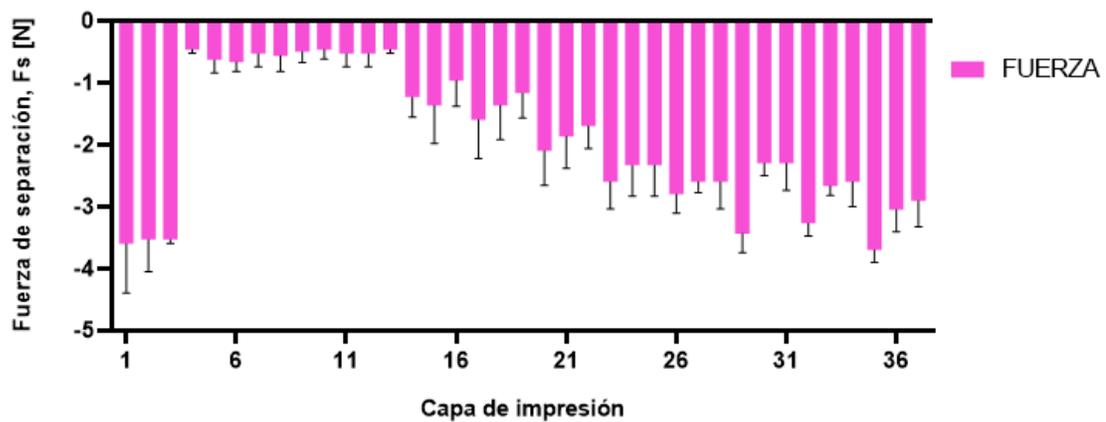
Si μ es constante durante la impresión se obtiene que $F_s \propto V$, por lo que se cumple en los dos casos mencionados, sin embargo en este modelamiento no está expuesta la variación de tiempo de exposición a la radiación, en el modelamiento aparte de la variación de velocidad se

tiene el tiempo de exposición (t_e) de la resina, lo que demuestra que no solamente la velocidad de avance afecta en la fuerza de separación si no también el tiempo que ha sido expuesta a la radiación la resina, aumentando la fuerza de separación en cada caso.

Teniendo como resultado que a mayor $F_s \propto V$ y $F_s \propto t_e$

Figura 34

Comportamiento de la Fuerza de separación durante la impresión de la probeta



En la Figura 34 se muestra el comportamiento general de la fuerza durante la impresión de la probeta, demostrando que una de las fuerzas máximas es en la capa de sobrecurado que es la capa de sujeción a la impresora (3 primeras capas), además en primer cambio de sección de mayor a menor diámetro existe una disminución de fuerza muy alta pero cuando se cambia de un

diámetro pequeño a uno más grande la fuerza de separación aumenta notablemente, sin embargo cuando se mantiene el diámetro en la siguiente capa, esta fuerza disminuye.

Obteniendo que la velocidad de elevación y tiempo de curación escogidos son 50 [$\mu\text{m/s}$] y 25 [s].

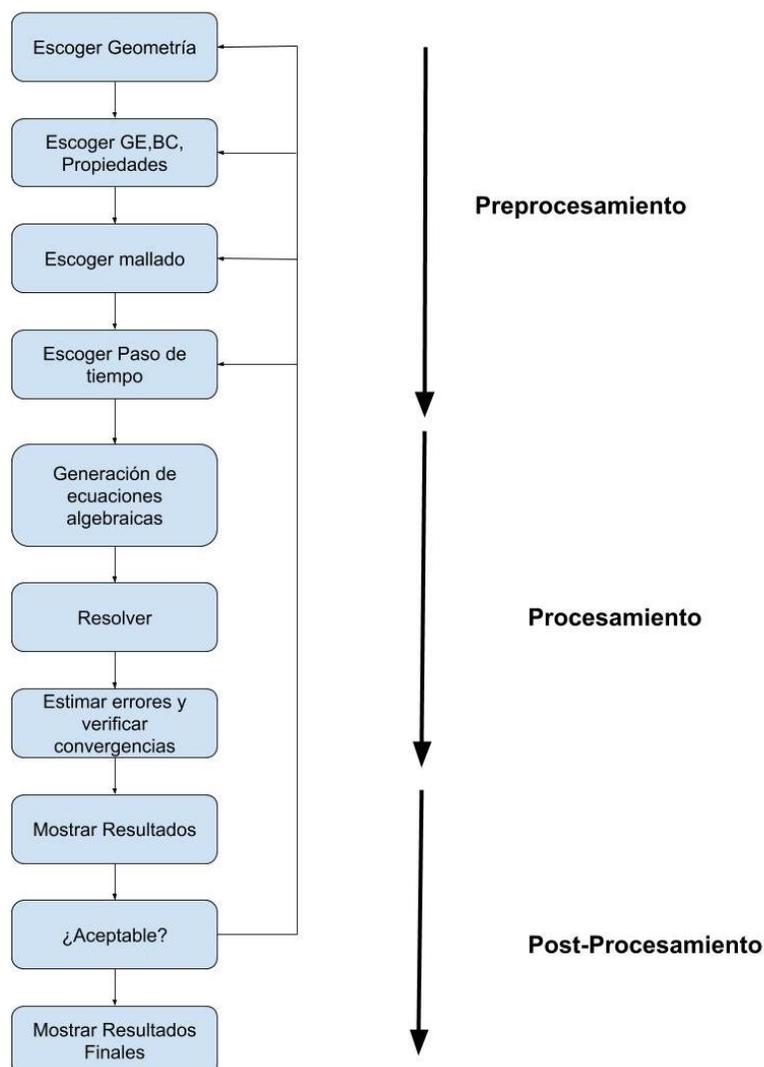
El trabajo de Pan presenta una fuerza de separación máxima de 2,44 [N] con una velocidad de elevación de 0,63 [mm/s] y en el presente trabajo se presenta una Fuerza de separación de 4 [N] con una velocidad de 60 [$\mu\text{m/s}$] (Pan et al., 2017).

Análisis de la estructura mediante el uso de elementos finitos

Para el procesamiento de en CAD de elementos finitos se siguió el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 35, se observa los pasos a seguir para una correcta simulación de esfuerzos en elementos finitos.

Figura 35

Proceso a seguir para la simulación en elementos finitos



Nota:(Datta & Rakesh, 2009)

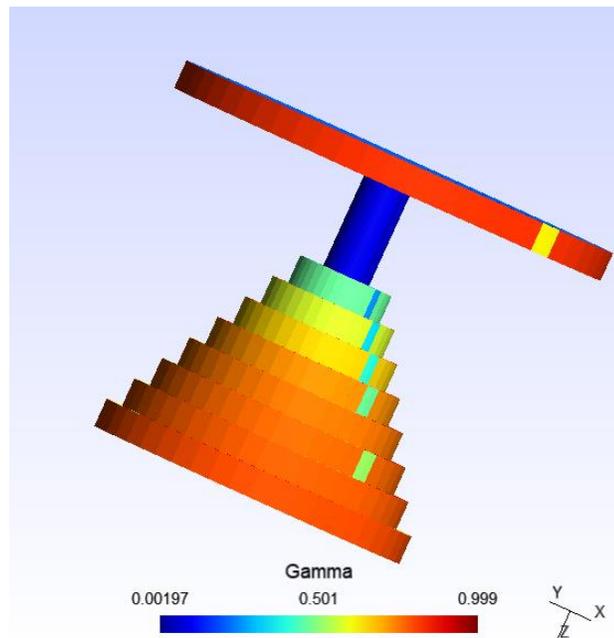
El modelamiento de las estructuras para caracterización de resistencia en verde se las realizó en varios programas, en Meshlab se realizó el procesamiento del mallado en el cual se hizo uso de Taubin Smooth el cual alisa las superficies por medio del uso de series de Fourier (Taubin, 1995). En la Figura 36 se puede observar como el mallado de la estructura mejora para la impresión y procesamiento del mismo.

Luego de esto se procedió a cambiarlo a formato .unv, para eso se utilizó el programa GMSH (GNU-GPL, USA) en donde se comprobó que el mallado está formado por 1151 nodos y 3959

tetraedro como se observa en la Figura 36 en donde se expone que gamma tiene valores cercanos a 1, esto se muestra cuando la estructura se colorea mayormente de rojo como es el caso de la Figura 36.

Figura 36

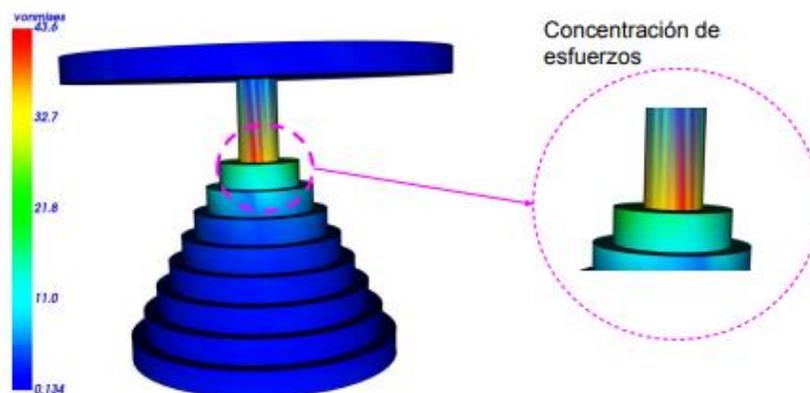
Mallado de estructura para caracterización de resistencia en verde.



Se continúa con el procesamiento llevándolo al programa ELMER GUI (CSC, Finlandia) en donde se realiza la medición de esfuerzos con la fuerza máxima de separación obtenida en el proceso de impresión de las estructuras para caracterización de resistencia en verde. En la Figura 37 se muestra los esfuerzos de Von Mises en la estructura, el color rojo en la estructura representa el lugar donde se encuentra el valor más alto de la escala mostrada al lado izquierdo de la imagen, manifestando que en ese lugar es donde se produciría una fractura si el esfuerzo obtenido es mayor al esfuerzo último de la resina en verde.

Figura 37

Esfuerzos de Von Mises en la estructura para caracterización de resistencia en verde



En el procesamiento se hizo uso de las propiedades de la resina en verde, en la que su módulo de elasticidad es 2000 [MPa] y su coeficiente de Poisson es 0,45 (Liravi et al., 2015), para el cálculo del factor de seguridad (FS), el esfuerzo último utilizado es de 33.229 [MPa] (Ayala & Contreras, 2019).

En la

Tabla 7 se muestra el esfuerzo máximo obtenido de cada estructura para caracterización de resistencia en verde impresa, además del FS, en donde los valores son menores a 1, temiendo como resultado la rotura de todas las estructuras con la fuerza máxima de separación, lo que se termina cumpliendo durante la impresión.

Tabla 7

Esfuerzos máximos de las Estructuras para caracterización de resistencia en verde.

Esfuerzos Máximos [MPa]	FS
43,6	0,76
61,7	0,54
61,7	0,54
72,6	0,46
87,1	0,38
61,7	0,54

72,6	0,46
94,4	0,35
142,0	0,23

Impresión de estructuras porosas

Una vez calibrada la impresora con los parámetros de la Tabla 8 se procedió a la impresión de 3 estructuras porosas cúbicas de un piso y 3 de 3 pisos cuyas medidas son de 3, 4 y 5 [mm] de altura por piso.

Tabla 8

Parámetros de impresión

Espesor de capa [μm]	Velocidad de elevación [μm/s]	Tiempo de curado [s]	Tiempo de sobrecurado	Número de capas de sobrecurado
150	50	25	50	3

Tabla 9

Características físicas de las estructuras porosas

Altura [mm]	Diámetro de poro [mm]	Porosidad [%]
3	2,82	41,11
4	2,16	41,56
5	4,69	41,56
9	2,82	49,38

12	2,16	51,83
15	4,69	51,84

La tabla 9 muestra las características físicas de las estructuras porosas que se usaron para la realización del experimento.

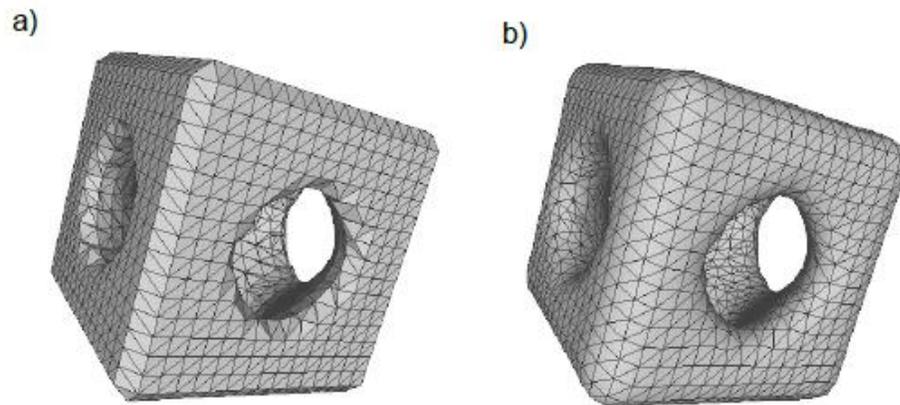
Análisis de estructuras porosas

Estructura porosa de un piso

El diseño de la impresión se lo puede apreciar en la Figura 38. Esta estructura se la proceso en Meshlab, haciendo uso del Taubin Smooth para un mejor mallado, en la Figura 38 se observa el cambio producido por el procesamiento de la pieza.

Figura 38

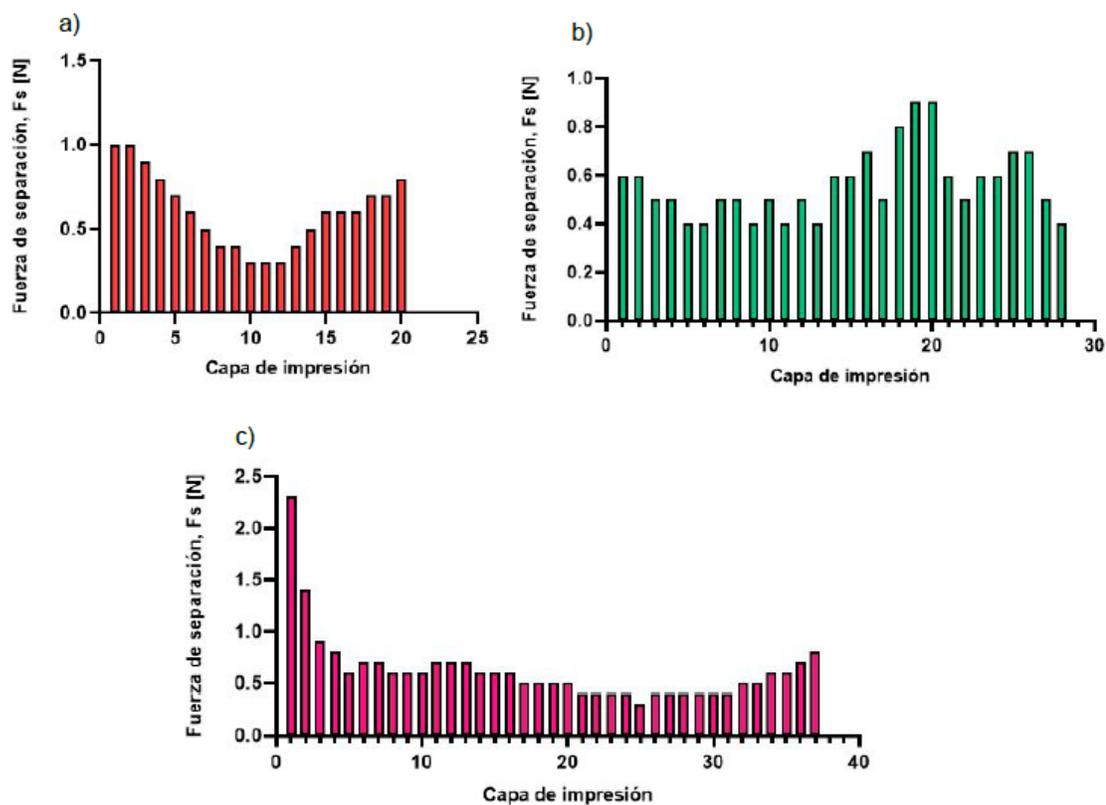
Andamios Porosos. a) Sin Taubin Smooth. b) Con Taubin Smooth.



La supervisión de los andamios porosos se lo hizo por medio del programa EDMS obteniendo los datos mostrados en la Figura 39.

Figura 39

Fuerza de separación de estructuras porosas. a) Estructura porosa de 3 [mm] de lado. b) Estructura porosa de 4 [mm] de lado. c) Estructura porosa de 5 [mm] de lado.



Nota: Las gráficas no presenta una desviación estándar debido a que se tomó los datos de la pieza más representativa para cada caso.

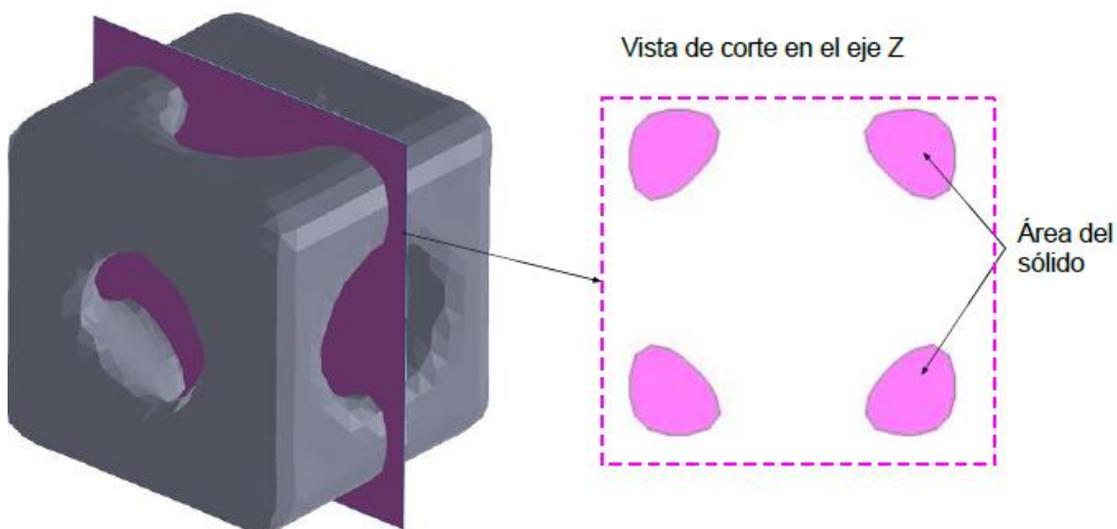
La supervisión de los andamios porosos se la hizo por medio del programa EMS obteniendo los datos mostrados en la Figura 39

La supervisión de los andamios porosos se lo hizo por medio del programa EDMS obteniendo los datos mostrados en la Figura 39.

Figura 39 se observa la misma tendencia de las fuerzas de separación, en la cual los mayores valores se encuentran en los extremos, esto se debe a que existe una mayor área curada, y en las capas intermedias existe una disminución de fuerza de separación debido a la disminución del área de exposición. El área a imprimir en el centro de la estructura se la puede observar en la Figura 40.

Figura 40

Área en exposición en la mitad del andamio



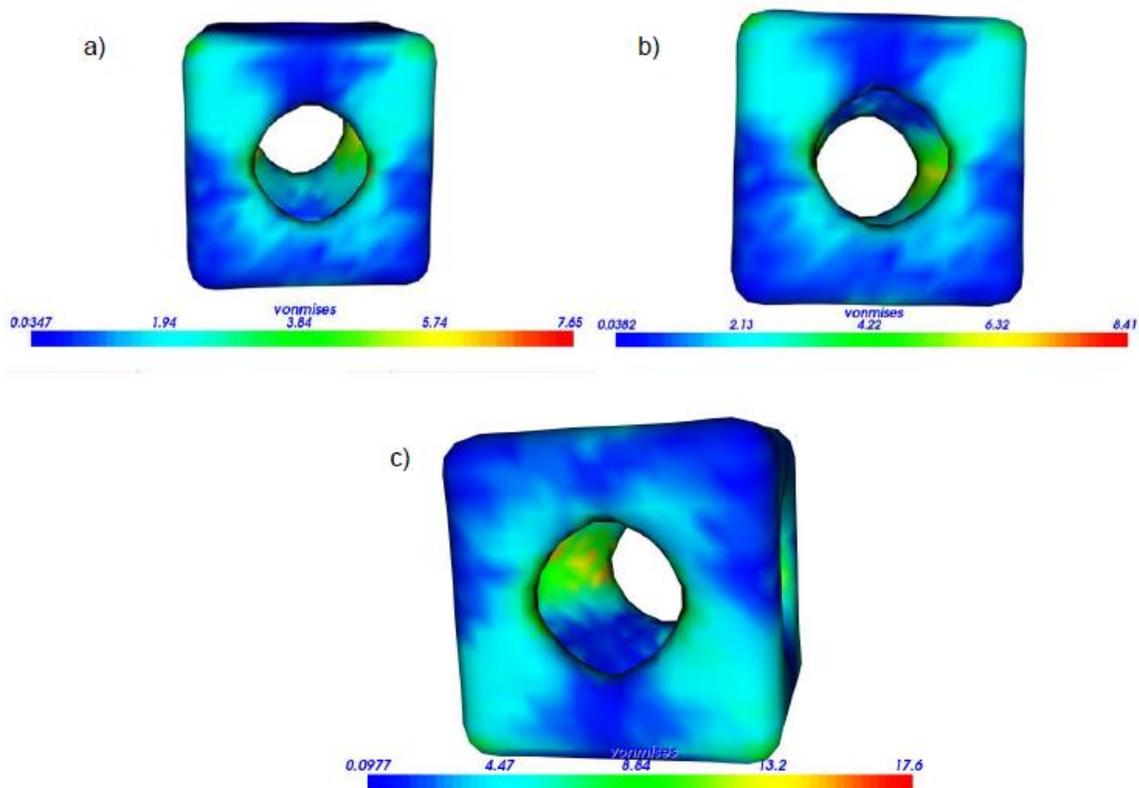
Teniendo como resultado que la fuerza de separación mínima (0.4 [N]) y la fuerza de separación máxima (1 [N]) obviando las fuerzas producidas en las capas de sobrecurado,

permitiendo la impresión total de la pieza, Pan en las estructuras porosas con una velocidad de 0,63 [mm/s] obtiene una fuerza de separación de 6,16 [N] (Pan et al., 2017).

Una vez obtenidos los resultados de las fuerzas máximas de separación, se realizó el procesamiento de los andamios porosos en ELMER GUI, en donde se obtuvieron los esfuerzos de Von Mises. En la Figura 41 se muestra los esfuerzos producidos en el proceso de impresión. Para el procesamiento se hizo uso de las propiedades de la resina en verde (Módulo de Elasticidad=2000 [MPa] y coeficiente de Poisson= 0,45).

Figura 41

Esfuerzos de Von Mises de los andamios porosos de 1 piso.



Nota: a) Andamio poroso de 3 [mm] de longitud de lado. b) Andamio poroso de 4 [mm] de longitud de lado. c) Andamio poroso de 5 [mm] de longitud de lado.

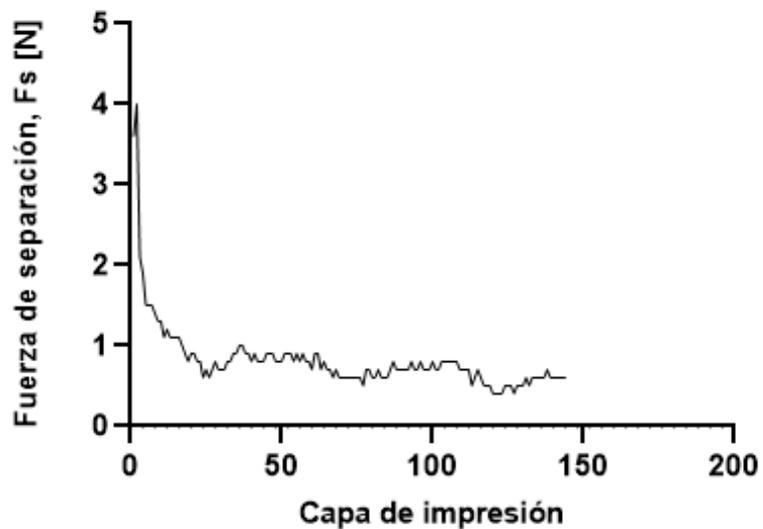
La variación de colores desde el azul hacia el rojo en la estructura representa la concentración de los esfuerzos producidos, donde de acuerdo al color, el esfuerzo va variando en la pieza, cuyos valores se encuentran en la barra inferior de la imagen.

Estructura porosa de tres pisos

Las estructuras porosas tendrán una altura total de 9, 12 y 15 [mm] y el diseño poroso se lo puede observar en la Figura 24-b).

Figura 42

Fuerza de separación de estructura porosa de tres pisos

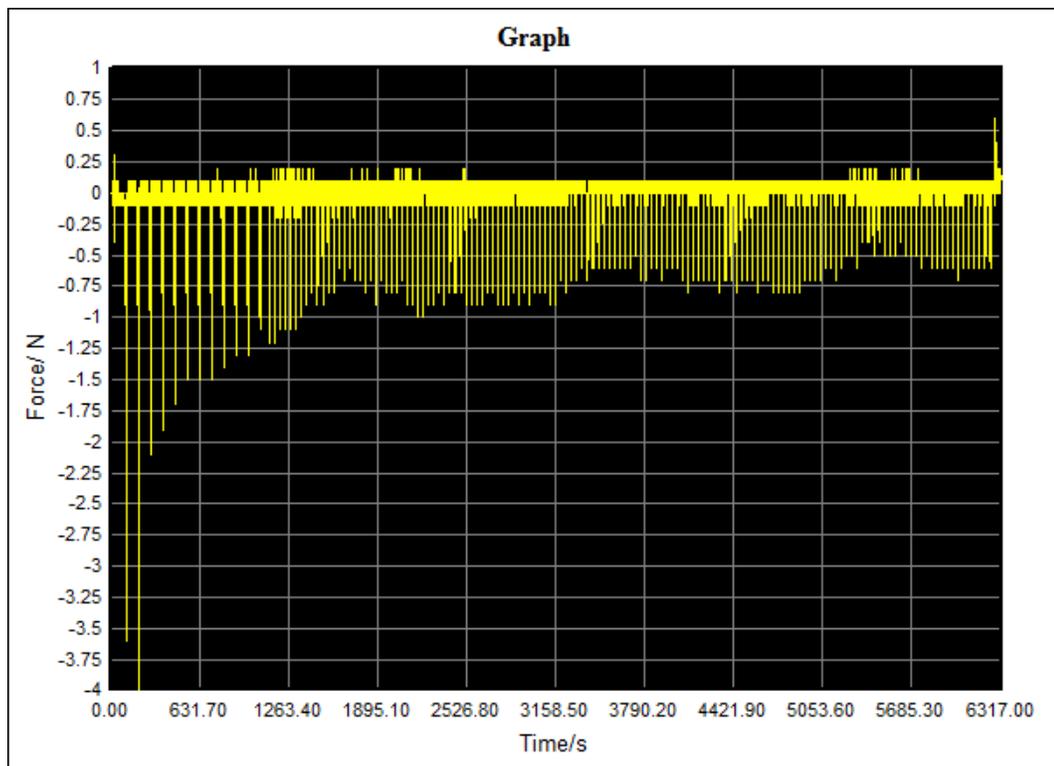


Las fuerzas de separación de la Figura 42 fueron obtenidas de la impresión de los andamios poros de tres pisos por medio del Programa EDMS.

Al igual que en el caso de la estructura porosa de un piso la tendencia de las fuerzas de separación, en la cual los mayores valores se encuentran en los extremos, este ciclo se repite dos veces más dando como resultado tres periodos bien marcados y en los cuales se puede identificar con facilidad el inicio y fin de cada piso. La Figura 43 se observa de mejor manera el periodo hablado anteriormente. La fuerza de separación máxima obtenida en este proceso sin tomar en cuenta las capas de sobrecurado es de 1 [N].

Figura 43

Diagrama de fuerzas obtenido del programa EDMS

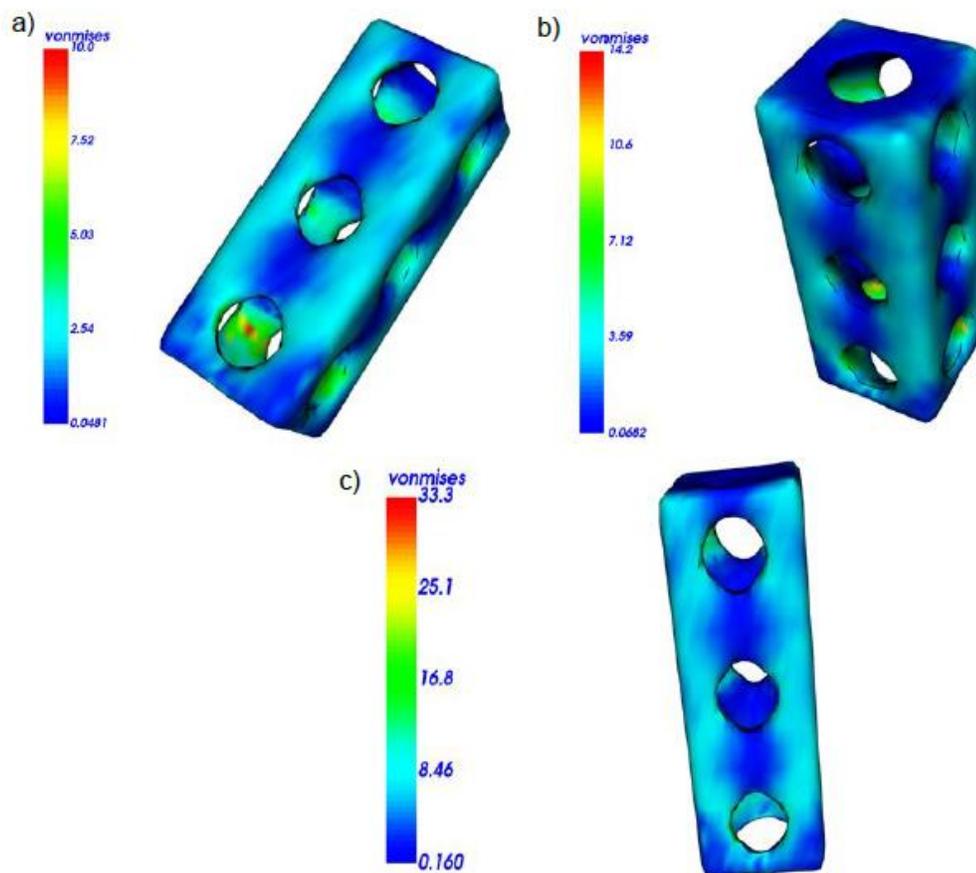


La Figura 43 muestra las fuerzas obtenidas durante la impresión de la pieza donde los valores se los obtiene con un tiempo de muestreo de 100 [ms], esto quiere decir que cada 100 [ms] se adquiere un valor de la fuerza, dando como resultado pulsos con valores y no una línea continua. En la gráfica se muestra la fuerza obtenida vs el tiempo real de adquisición.

Se realizó el mismo procesamiento en ELMER GUI que se hizo en los andamios porosos de un piso , con las mismas propiedades mecánicas del material, obteniendo los esfuerzos de Von Mises mostrados en la Figura 44.

Figura 44

Esfuerzos de Von Mises de los andamios porosos de 3 piso



Nota: a) Andamio poroso de 3 [mm] de longitud de lado por piso. b) Andamio poroso de 4 [mm] de longitud de lado por piso. c) Andamio poroso de 5 [mm] de longitud de lado por piso.

Las variaciones de los colores representan los esfuerzos distribuidos en toda la pieza, siendo el valor más alto de color rojo y los más bajos de azul, como se muestra en la Figura 44.

Análisis de datos

Los esfuerzos máximos obtenidos durante la impresión de las estructuras porosas se los muestra en la Tabla 10, en donde los tres primeros valores le corresponden a las estructuras de un piso y los tres siguientes a las estructuras de tres pisos.

Tabla 10

Esfuerzos máximos de andamios porosos

Esfuerzo Máximos [Mpa]	FS
7,65	4,34
8,41	3,95
17,6	1,89
10,0	3,32
14,2	2,25
30,3	1,10

El FS se lo calculó con un esfuerzo último de la resina en verde igual a 33.229 [MPa] (Ayala & Contreras, 2019) siendo los valores mayores a 1, concluyendo que los andamios impresos no se romperían durante la construcción de los mismos. Esto se comprueba con la Figura 39 y Figura 42 en las cuales se muestra la impresión completa de los andamios.

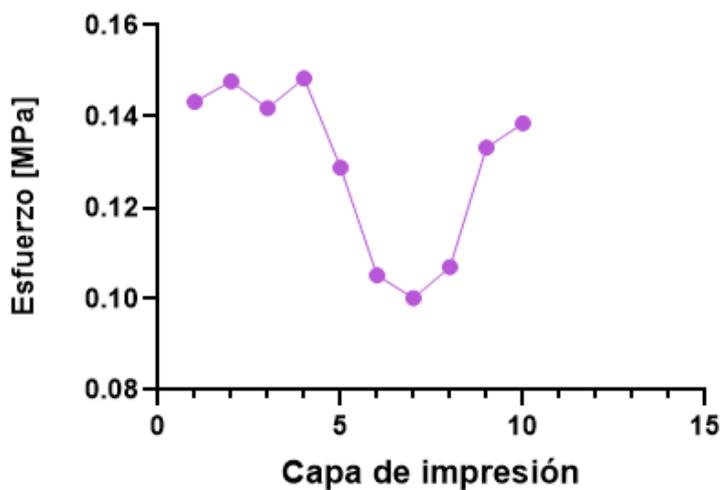
Mediante el uso de Meshlab se midió la superficie de las capas de impresión permitiendo el cálculo de los esfuerzos obtenidos durante la fabricación de los andamios porosos.

En la

Figura 45 se muestra el esfuerzo producido por cada capa de impresión, mostrando que en las primeras y últimas capas el esfuerzo es mayor, esto se debe a que el área de expuesta a la radiación es mayor y su fuerza de separación crece, en cambio en las capas centrales su esfuerzo disminuye y esto se debe a que el área expuesta es menor generando una menor fuerza de separación, siguiendo el mismo patrón de fuerza de separación vs capa de impresión.

Figura 45

Esfuerzo Vs. Capa de impresión de andamios porosos de 1 piso.

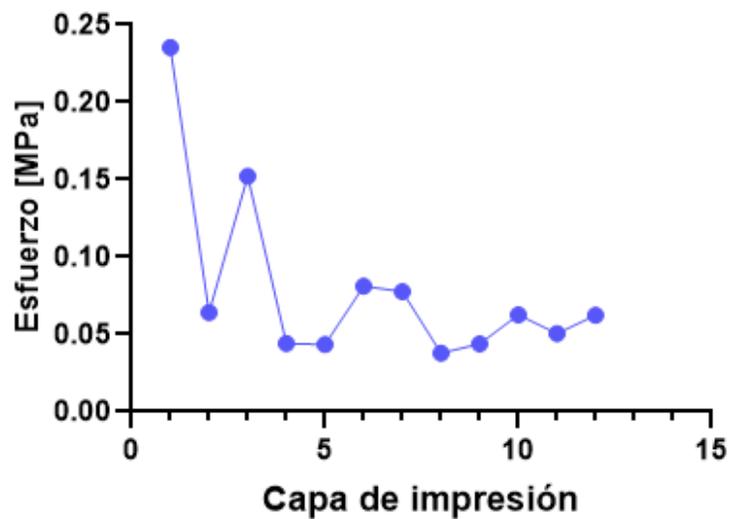


Los esfuerzos producidos por las capas de los andamios porosos de tres pisos se los observa en la Figura 46, los cuales se calcularon con las fuerzas de separación obtenidas del

monitoreo de la fabricación de los andamios y la medición de las superficies correspondientes con el uso del programa Meshlab. Consiguiendo la misma tendencia de fuerza de separación Vs. Capa de impresión mostrada en la Figura 42, donde a mayor área, mayor es el esfuerzo, teniendo tres caídas de los valores de esfuerzos con mínimo de 0.1 [MPa].

Figura 46

Esfuerzo Vs. Capa de impresión de andamios porosos de 3 pisos.



Análisis de Gyroid

El andamio poroso que se analizó de forma computacional fue el Gyroid, el cual tomó dos porosidades diferentes variando el tamaño de poro con el coeficiente N (Walker et al., 2017)

de la Ecuación 3, con los valores de 1,5 y 2 y un valor de $C=0,2$. En la Tabla 11 se muestra las características geométricas de los andamios y se ratifica que variando N se obtiene porosidades diferentes.

Tabla 11

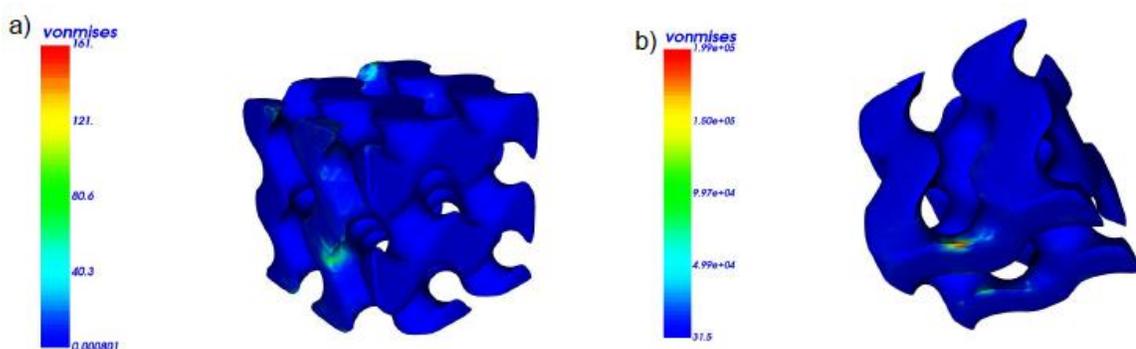
Características geométricas de los Gyroid.

Altura [mm]	Diámetro de poro [mm]	Porosidad [%]	Viga [mm]	N
5	1,22	52,048	1,28	2,0
5	1,61	49,888	1,58	1,5

El procesamiento de esfuerzos se lo realizó en ELMER GUI con los parámetros siguientes: Módulo de elasticidad = 2 [GPa], Coeficiente de Poisson = 0,45 y Fuerza normal= 1,2 [N]. La fuerza normal utilizada fue la fuerza máxima de separación obtenida durante la impresión del andamio poroso de un piso de 5 [mm] de longitud de lado (Figura 39-c)).

Figura 47

Esfuerzo de Von Mises en Gyroids.



Nota: a) Gyroid con N=2. b) Gyroid con N=1,5

En la Figura 47 se observa los esfuerzos producidos, si la estructura fuera impresa en resina fotocurable, mostrando que a menor porosidad, mayor es el esfuerzo. Teniendo esfuerzos

máximos de 0,199 [MPa], siendo menor, al esfuerzo último de la resina en verde de 33.229 [MPa] obteniendo un FS de 279,23.

Influencia del mallado de la estructura sobre la simulación y fabricación de los andamios

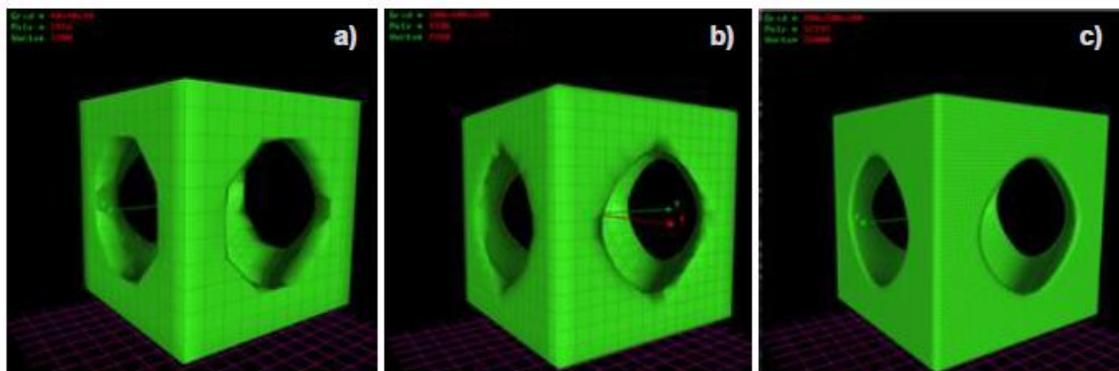
Dentro del diseño asistido por computadora de estructuras porosas existen algunas variables que necesitan ser controladas para la obtención de los resultados deseados, dentro de estas variables se encuentra el mallado de la estructura, que con el uso de Mathmod se lo puede variar desde 0 hasta 400 en donde 0 es bastante irregular y 400 muy preciso.

El resultado de la subdivisión de la pieza mayor en varias piezas pequeñas, en formas tales como triángulos, cuadrados, entre otros, obtiene un número finito de subpiezas, las cuales se nombran como elementos finitos, la unión de los nodos de estos elementos es a lo que se le conoce como mallado. Entre más número de elementos finitos se tenga, es decir, que el mallado sea más grande, más preciso será el análisis de esfuerzos en la pieza y más cercano será a la forma original (Sonzogni et al., 1996).

En el trabajo presente se realizó la influencia del mallado de la estructura porosa (véase en Figura 38-a) con un valor igual a 40 , 100 y 200, en la Figura 48 se puede observar la diferencia en cada uno de los mallados y como se va definiendo más la estructura.

Figura 48

Mallado de estructuras. a) Mallado de 40. b) Mallado de 100. c) Mallado de 200



Para el procesamiento de las estructuras se las llevó a Meshlab, en donde se midió la longitud de lado y el área de la sección transversal media en el eje Z . En la Tabla 12 se muestra las áreas de las secciones transversales medias, en donde existe una variación considerable de área, siendo la misma estructura pero con diferente mallado.

Tabla 12

Medición de áreas transversales

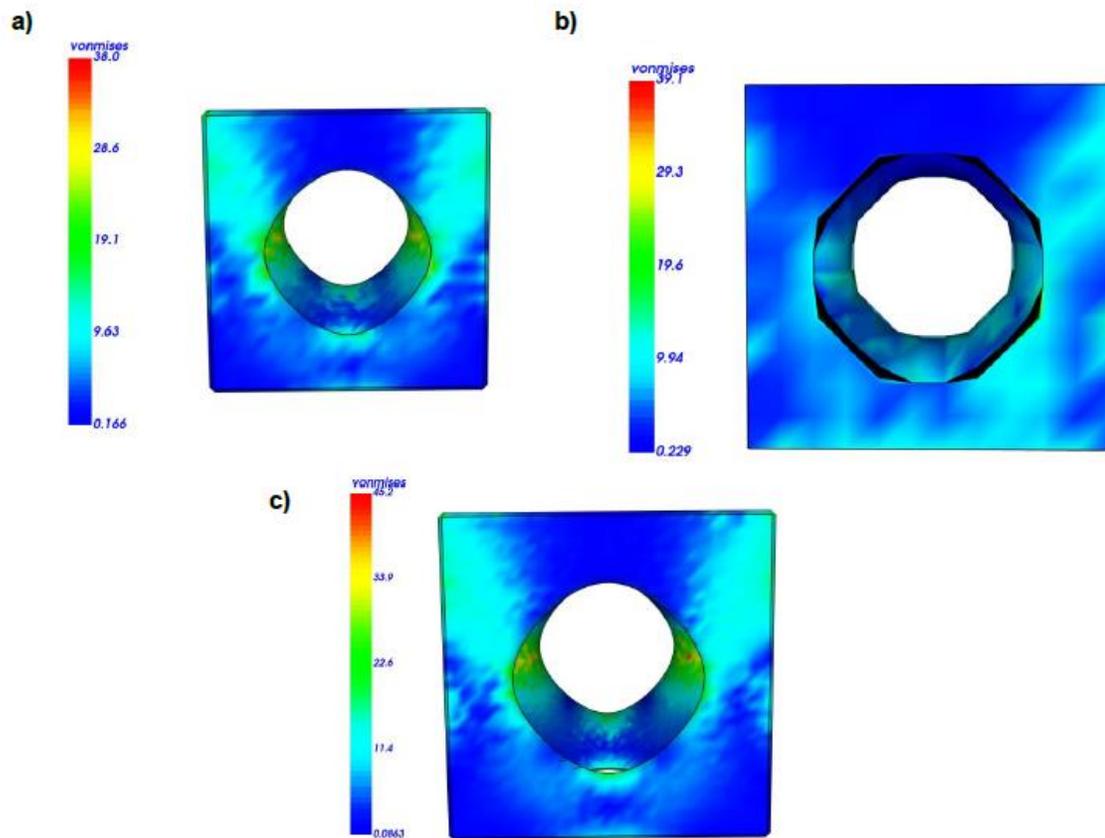
Mallado	Longitud de lado [μm]	Área de sección [μm^2]
40	700	52723,67
100	700	56554,55
200	700	57514,50

Al obtener un mayor mallado se obtiene una mejor definición de la pieza y un área transversal mayor, lo que produce una fuerza de separación mayor, haciendo más propensa a la estructura a romperse o deformarse durante el proceso de fabricación, ya que la $F_s \propto A$ (Pan et al., 2017) siendo A el área de exposición a la radiación UV-A.

Para un mejor análisis de cuanto influye el mallado de la superficie de una estructura se simuló los esfuerzos producidos durante la impresión de la estructura porosa con una fuerza de 2 [N], módulo de elasticidad de 2000 [MPa] y su coeficiente de Poisson de 0,45 (Liravi et al., 2015).

Figura 49

Esfuerzos de Von Mises a diferentes mallados. a) Mallado de 40. b) Mallado de 100. c) Mallado de 200.



En la Figura 49 se muestra los esfuerzos producidos en cada uno de los casos de mallado, al mantener el mismo material y la misma fuerza de separación, los esfuerzos son diferentes corroborando que el mallado de las estructuras influye en los esfuerzos producidos, teniendo como resultado que la pieza se rompa durante la fabricación de la misma.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentran los valores de esfuerzos producidos en la simulación para los diferentes mallados, que da como resultado que el esfuerzo mayor es de 45,2 [MPa] con un mallado de 200. Walker correlaciona la rotación de la estructura con los esfuerzos producidos siendo el resultado que a 45° de rotación los esfuerzos sobre el andamio son menores, esto se debe a la menor área de cada capa (Walker et al., 2017). Por lo que el mallado de mayor calidad genera una mayor área en cada capa obteniendo un esfuerzo mayor durante la impresión.

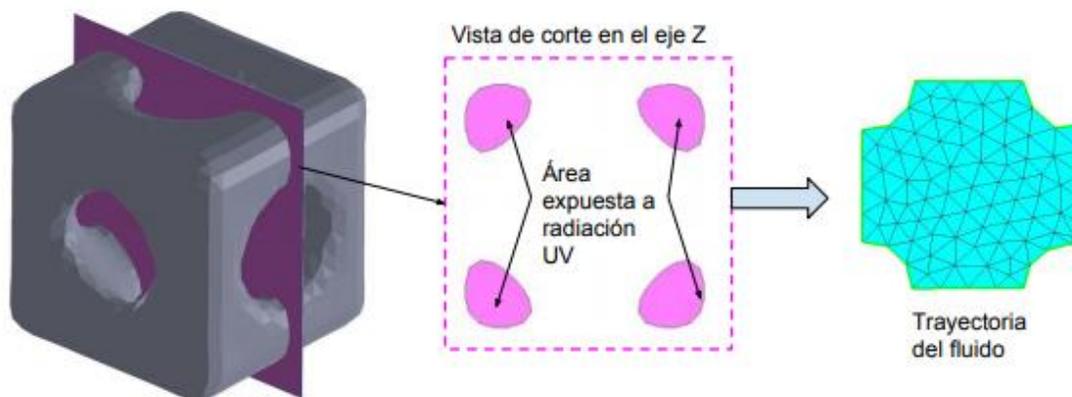
Tabla 13*Esfuerzos de Von Mises a diferentes mallados*

Mallado	Esfuerzos Máximos [MPa]
40	38,0
100	39,1
200	45,2

Tortuosidad

La tortuosidad es una característica geométrica presente en los andamios porosos la cual determina cuanta facilidad tiene un fluido en transportarse por medio de los poros (Starly et al., 2007). Para el análisis de la tortuosidad de los andamios porosos se hizo uso de las secciones centrales de los ejes “x”, “y”, y “z”, estas se obtuvieron con Meshlab, como se puede ver en la Figura 40, una vez obtenida esta sección se procedió a dibujar el perfil de la trayectoria del flujo mostrado en la Figura 50.

El signo de la velocidad obtenida en cada uno de los casos representa la dirección en la que se produce la velocidad en cada una de las secciones.

Figura 50*Trayectoria del fluido*

Realizada la trayectoria se procedió a analizar la velocidad del fluido en el área trazada por cada eje, los parámetros utilizados para la simulación se los muestra en la Tabla 14.

Tabla 14*Parámetros de simulación de fluidos*

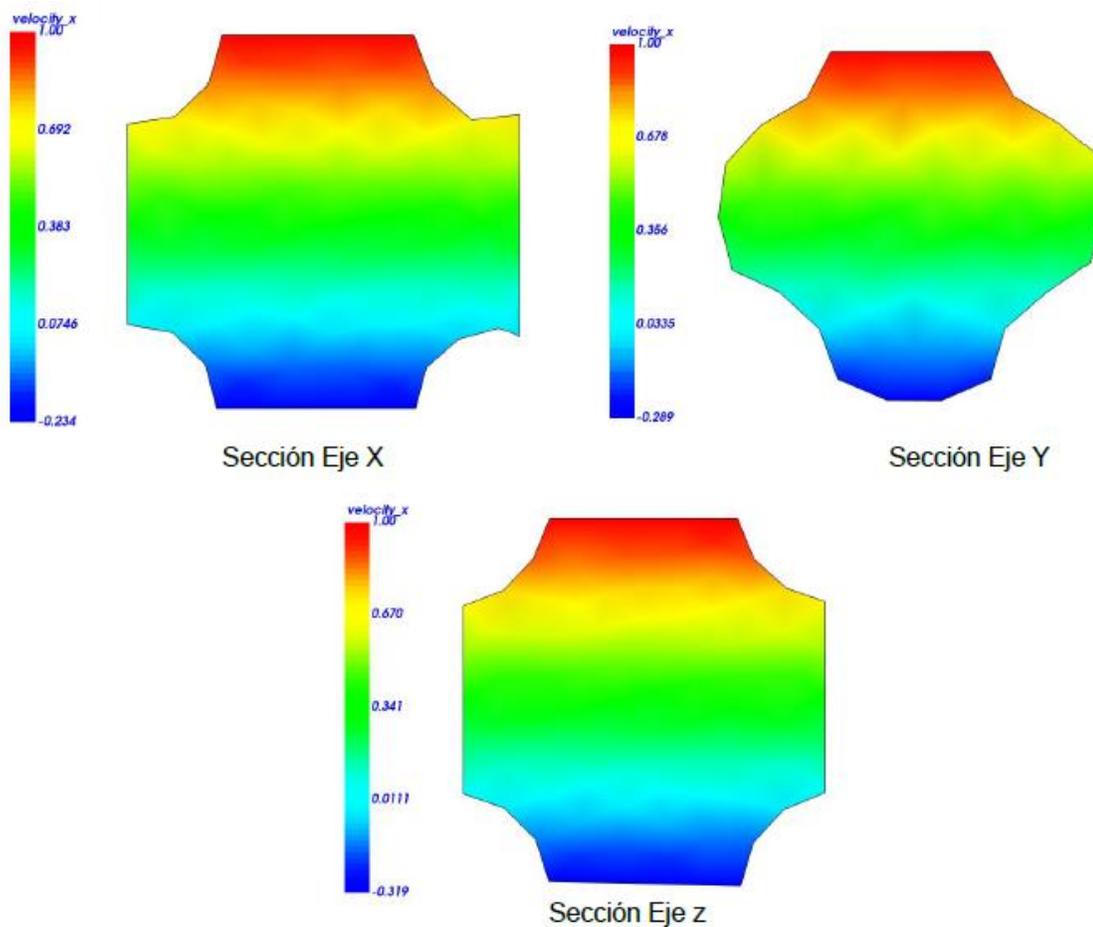
Velocidad [m/s]	Viscosidad del Agua [$\mu\text{Pa}\times\text{s}$]	Presión [MPa]
1	0,001	1

El procesamiento de las secciones se las hizo en ELMER GUI, en el cual se determinó las velocidades a lo largo de la trayectoria proyectada en cada uno de los ejes. En la Figura 51 se muestra las velocidades en el andamio poroso de un piso, en donde la velocidad del fluido (Agua), cambia gradualmente de arriba hacia abajo y se mantiene homogénea de derecha a izquierda dando una tortuosidad homogénea, favoreciendo el paso del fluido por los poros. Estas estructuras son diseñadas para aplicaciones en ingeniería de tejidos y que se reconstruirán en un material biocompatible, para luego ser sumergidos en fluidos a determinadas velocidades. La

velocidad en el eje Z (Velocidad mínima= -0,319 [m/s]) es menor que en los demás ejes, siendo este el camino más tortuoso.

Figura 51

Velocidad de Flujo en las diferentes secciones en los andamios porosos de un piso

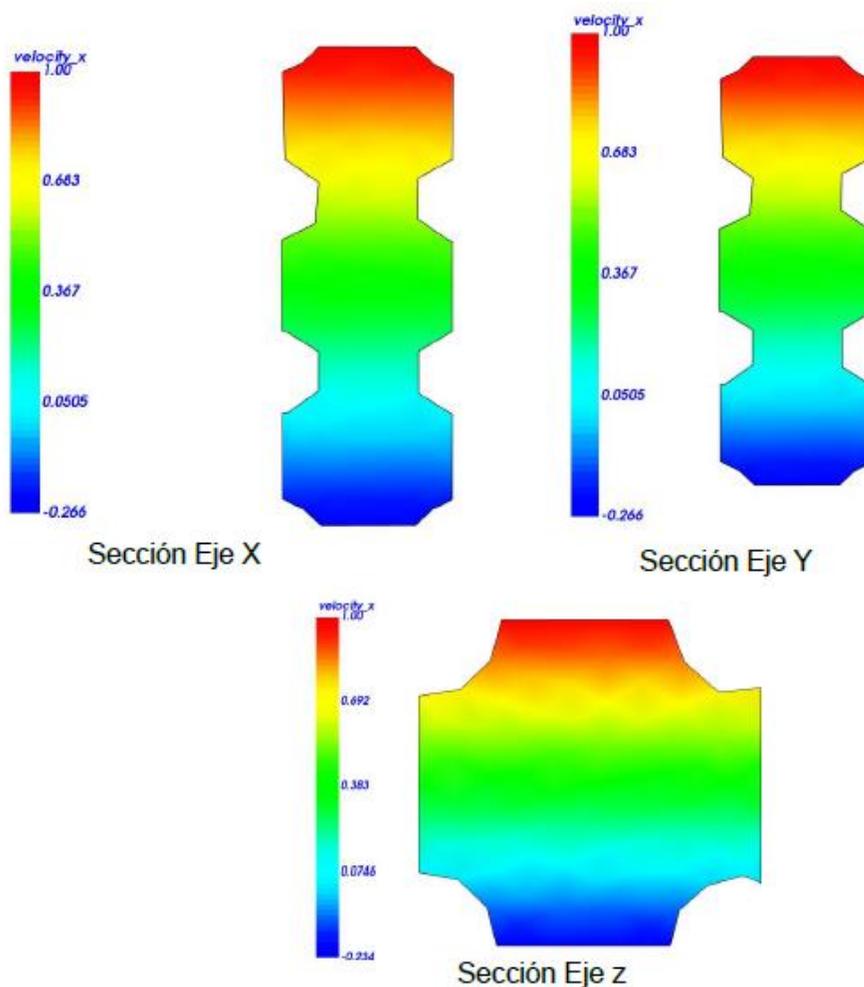


Para el análisis de velocidad de flujo en los andamios porosos de tres pisos, se tuvo que en las secciones transversales de los ejes X y Y fueron las mismas (Velocidad mínima=-0.266 [m/s]) y la velocidad en el eje Z (Velocidad mínima= -0.254 [m/s]) es mayor a las anteriores, obteniendo que el recorrido en los ejes X y Y son mucho más tortuosos que en el eje Z. En la Figura 52 se muestra la distribución de la velocidad de flujo y además, se observa una tortuosidad

homogénea, ya que no presenta variaciones de velocidades en las desviaciones presentes en la trayectoria.

Figura 52

Velocidades de fluidos de los andamios poros de tres pisos



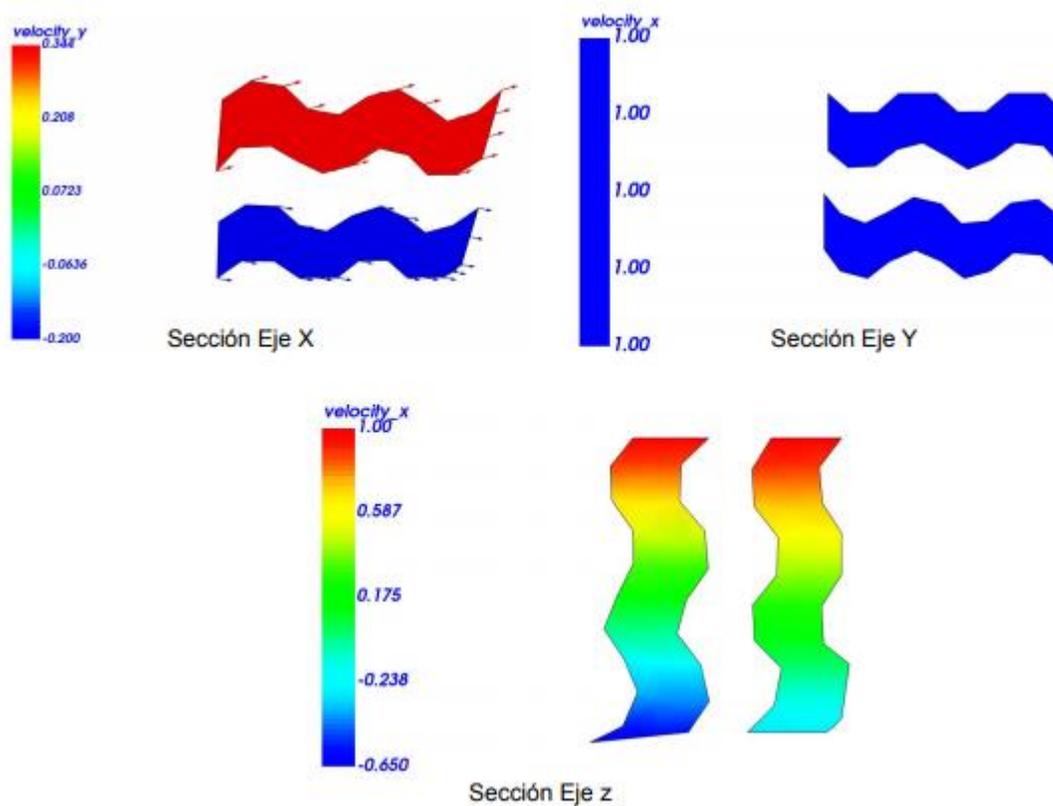
En la Figura 53 se muestra las velocidades del fluido a través del Gyroid con una porosidad del 52% aproximadamente, en el cual existe una tortuosidad homogénea, siendo idóneo para aplicaciones de ingeniería de tejidos.

En los ejes X y Y la variación de velocidad es nula pero si se observa la variación del eje Z es descendente y continua.

Siendo que a menor tortuosidad, mayor es la velocidad de fluido que atravesará el andamio (Starly et al., 2007). El eje con menor tortuosidad presente en el gyroid es el eje Y , donde mantiene su velocidad (1 [m/s]), y el camino más tortuoso es el eje Z , en el que su velocidad disminuye hasta -0.650 [m/s].

Figura 53:

Velocidades de Flujo del Gyroid de porosidad de 52%



Capítulo V

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

Conclusiones

La magnitud de la irradiancia a una distancia de 3 [mm] del foco LED UV-A es de 906 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] provocando una subida de temperatura considerable y que afectaría a las propiedades mecánicas de la resina, además de un sobrecurado durante la impresión de las estructuras taponando los poros del andamio, y a una distancia de 63 [mm], la irradiancia es de 53 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] el cual evita los problemas ya mencionados y permite una mejor calidad de impresión.

Para la impresión de la estructura porosa se tuvo que realizar la metrología y control de calidad de estructuras impresas tipo matriz, permitiendo tener una exactitud mucho más alta durante la impresión, dando paso a la fabricación de estructuras para la calibración de la resina en verde, en las cuales se obtuvieron que la fuerza que se genera durante el levantamiento de la plataforma de impresión, llamada fuerza de separación, es la causante de la rotura de las estructuras durante la manufactura y es directamente proporcional a la velocidad de elevación del eje z, este se puede apreciar en la Figura 33, además el tiempo de curación también interviene en el proceso de impresión siendo que a mayor tiempo de exposición a la radiación, mayor es la fuerza de separación.

Para la determinación de los parámetros de impresión de los andamios porosos se tubo presente el tiempo total de fabricación de la pieza y la velocidad de elevación que generó fuerzas de separación sean aceptables (F_s que no provocaran rotura en las primeras capas de impresión, si no en las últimas), concluyendo que el tiempo de curación idóneo es de 25 [s] y la velocidad de elevación es de 50 [$\mu\text{m}/\text{s}$], ya que con esta variación, el tiempo de manufactura es medio y las fuerzas de separación obtenidas no provocaban la rotura de la estructura.

El diseño de las estructuras porosas se lo hizo variando la longitud de lado, con el cual se obtenía un diámetro de poro distinto y una variación de porosidad (véase Tabla 9), lo que generó una variación de área transversal obteniendo fuerzas de separación máximas de 1 [N] durante la impresión de las estructuras porosas y durante la impresión de la menor área, la fuerza de separación fue de 0.3 [N], lo que permitió la terminación de impresión de la estructura.

La simulación de los esfuerzos de Von Mises de los andamios porosos permitió obtener los FS, concluyendo que la impresión de las estructuras iba a ser completa y los parámetros de impresión anteriormente escogidos fueron los correctos.

La tortuosidad mostrada en los andamios porosos es homogénea, reconociendo que este diseño sea factible para una aplicación en la ingeniería de tejidos, ya que la velocidad del fluido no se verá afectada por la forma del andamio poroso.

El eje de mayor tortuosidad, en general, de las estructuras simuladas es el eje z, siendo este el eje con menor velocidad en cada uno de los casos.

El mallado de la superficie de los andamios porosos juega un importante papel en el momento de la construcción de los mismos ya que genera una variación de área en cada máscara de proyección, siendo que, a mayor mallado, mayor es el área a exposición y mayor definición de la estructura, produciendo una mayor fuerza de separación en el momento de la fabricación.

Recomendaciones

La impresora que se utilizó en el estudio de este trabajo cuenta con una resolución de 150 [μm], lo que puede resultar perjudicial al momento de la impresión de estructuras porosas, ya que, en ciertos casos, los poros suelen llegar a ser muy pequeños y durante el proceso de

fabricación desaparecen por la resolución de la misma, por lo que se recomienda cambiar el tornillo sin fin, con la finalidad de obtener una resolución más pequeña. Además de la recalibración de escala, la cual presenta un error significativo en la pieza final.

Para obtener un mejor estudio de la fuerza de separación, se recomienda la medición de viscosidad a la temperatura en la que se encuentra la resina durante la impresión, esto permitirá obtener resultados más reales para el estudio de la resina en verde.

Para el monitoreo de la impresión de las estructuras se recomienda que el equipo se encuentre siempre conectado a una fuente de poder, porque puede existir pérdidas significativas de datos al apagarse el equipo.

Obtener las propiedades mecánicas de la resina en verde, ayudará a tener resultados de esfuerzos simulados más cercanos a los valores conseguidos durante la impresión de la estructura.

Se recomienda un mallado medio (de 50 a 100 en el programa Mathmod) para la construcción de andamios porosos debido a que la impresora no tiene la capacidad de una alta definición y además, un mallado mayor afectaría aumentando las fuerzas de separación.

Trabajos a futuro

Se recomienda para trabajos futuros el estudio de la influencia de la dureza sobre las estructuras porosas además del estudio de la micrografía de la resina curada a diferentes magnitudes de irradiancia para obtener una mejor caracterización de la resina fotocurable.

Este trabajo estudia un modelo TPMS, se recomienda realizar modelos estocásticos y otros modelos TPMS para una mejor obtención de datos de fuerzas de separación y determinar de mejor manera los parámetros de manufactura.

Realizar comparaciones de fuerzas de separación del actual proyecto con las fuerzas de separación creadas en otra impresora, al fabricar el mismo modelo de TPMS y estructuras para

caracterización de resistencia en verde podría aportar en el mejoramiento de la impresora y el sistema de experimentación.

Realizar pruebas mecánicas de las estructuras impresas para determinar si la variación de temperatura durante la impresión, cambia las propiedades mecánicas iniciales del material.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala, F., & Contreras, F. (2019). *Caracterización mecánica de composite UV fotocurable resina astrocaryum chambira ecuatoriana*.
- Barreiro Elorza, P., & Ruiz-Altisent, M. (2002). Bio-mecatrónica: Aspectos innovadores de la mecanización. *Vida Rural*, 50-53.
- Bártolo, P. J. (2011a). *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Bártolo, P. J. (2011b). *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1), 389-405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- Bochove, B. van, Hannink, G., Buma, P., & Grijpma, D. W. (2016). Preparation of Designed Poly(trimethylene carbonate) Meniscus Implants by Stereolithography: Challenges in Stereolithography. *Macromolecular Bioscience*, 16(12), 1853-1863. <https://doi.org/10.1002/mabi.201600290>
- Chee, K. C., Chee, H. W., & Wai, Y. Y. (2017). *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing | ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128134894/standards-quality-control-and-measurement-sciences-in-3d-printing-and-additive-manufacturing>
- Datta, A., & Rakesh, V. (2009). *An Introduction to Modeling of Transport Processes: Applications to Biomedical Systems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801150>

- Egan, P. F., Gonella, V. C., Engensperger, M., Ferguson, S. J., & Shea, K. (2017). Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing. *PLOS ONE*, *12*(8), e0182902. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182902>
- Fonseca-Páez, L. A., Trujillo-Castro, E., & Peña-Rodríguez, G. (2019). Tortuosidad y permeabilidad de materiales cerámicos mesoporosos de caolín y diatomita. *Revista UIS Ingenierías*, *18*(1), 111-118. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019009>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies-3D Printing, Rapid Prototyping, Direct Digital Manufacturing* (Segunda). Springer Science+Business Media.
- Gómez, S., Vlad, M. D., López, J., & Fernández, E. (2016). Design and properties of 3D scaffolds for bone tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, *42*, 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.06.032>
- Hatzenbichler, M., Geppert, M., Gruber, S., Ipp, E., Almedal, R., & Stampfl, J. (2012). DLP-based light engines for additive manufacturing of ceramic parts. *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications IV*, *8254*, 82540E. <https://doi.org/10.1117/12.907113>
- Jacobs, P. F. (1992). *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.
- Lara Padilla, H., Rodríguez, C. A., & Dean, D. (2020). *Fabrication of porous scaffolds using additive manufacturing with potential applications in bone tissue engineering* (Patent N.º #62/715596).
- Liravi, F., Das, S., & Zhou, C. (2015). Separation force analysis and prediction based on cohesive element model for constrained-surface Stereolithography processes. *Computer-Aided Design*, *69*, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.05.002>
- Lorenti, D. A. (2017). *INGENIERÍA DE TEJIDOS*. 60.

- Matveev, A. N. (1988). *Optics*. Mir Publishers.
- Meyer, U., Meyer, T., Handschel, J., & Wiesmann, H. P. (Eds.). (2009). *Fundamentals of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77755-7>
- Michielsen, K., & Koe, J. S. (2003). Photonic band gaps in materials with triply periodic surfaces and related tubular structures. *Physical Review B*, 68(11), 115107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.115107>
- Mott, E. J., Busso, M., Luo, X., Dolder, C., Wang, M. O., Fisher, J. P., & Dean, D. (2016). Digital micromirror device (DMD)-based 3D printing of poly(propylene fumarate) scaffolds. *Materials Science and Engineering: C*, 61, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.11.071>
- NanoDLP - Software for SLS/SLA/DLP 3D Printers*. (2012). <https://www.nanodlp.com/>
- Oleaga, I. S. (2015). *Andamios porosos* [[Http://purl.org/dc/dcmitype/Text](http://purl.org/dc/dcmitype/Text), Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=100905>
- Pallua, N., & Suschek, C. V. (2011). *Tissue Engineering from Lab to Clinic*. Springer Science & Business Media.
- Pan, Y., He, H., Xu, J., & Feinerman, A. (2017). Study of separation force in constrained surface projection stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 353-361. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0188>
- Sagar. (2014). *Cryogenic Micropunching of Polymeric Films for Tissue Engineering Applications—ProQuest*. <https://search.proquest.com/openview/eaef26674b0a6cbcd8a4d609bede33b1/1?cbl=18750&diss=y&pq-origsite=gscholar>

- Shi, J., Zhu, L., Li, L., Li, Z., Yang, J., & Wang, X. (2018). A TPMS-based method for modeling porous scaffolds for bionic bone tissue engineering. *Scientific Reports*, *8*(1), 7395. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25750-9>
- Smith, W. F. (1999). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. MCGRAW-HILL.
- Sonzogni, V. E., Bergallo, M. B., & Neuman, C. E. (1996). Uso de una Malla Compuesta para Estimar Errores de Discretización y Mejorar la Solución en Elementos Finitos. *Mecánica Computacional*, *16*(2), 123-132.
- Starly, B., Yildirim, E., & Sun, W. (2007). A tracer metric numerical model for predicting tortuosity factors in three-dimensional porous tissue scaffolds. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *87*(1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2007.04.003>
- Taubin, G. (1995). (PDF) *A Signal Processing Approach To Fair Surface Design*. ResearchGate. <https://doi.org/10.1145/218380.218473>
- Thavornnyutikarn, B., Chantarapanich, N., Sitthiseripratip, K., Thouas, G. A., & Chen, Q. (2014, diciembre). *Bone Tissue Engineering Scaffolding: Computer-Aided Scaffolding Techniques*. ResearchGate. <https://doi.org/10.1007/s40204-014-0026-7>
- Walker, J. M., Bodamer, E., Kleinfehn, A., Luo, Y., Becker, M., & Dean, D. (2017). *Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed poly(propylene fumarate) scaffolds* | SpringerLink. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-017-0021-3>
- Wayback Machine. (2016, noviembre 30). <https://web.archive.org/web/20161130190429/http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/49.pdf>
- Yang, Y., Li, L., & Zhao, J. (2019). Mechanical property modeling of photosensitive liquid resin in stereolithography additive manufacturing: Bridging degree of cure with tensile strength

and hardness. *Materials & Design*, 162, 418-428.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.009>

ANEXOS