



**Estudio de las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales poliméricos
estructurales con porosidad aleatoria**

Jiménez Carrión Cinthya Paola

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

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

Ing. Lara Padilla Hernán Vinicio, PhD

20 de febrero del 2023

Estudio de las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria-Cinthy-Jimenez-17022023

< 1%  < 1% Texto entre comillas
Similitudes 0% similitudes entre comillas
0% Idioma no reconocido

Nombre del documento: Estudio de las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria-Cinthy-Jimenez-17022023.pdf
ID del documento: 636ecb62c977edc03b7c71fe233b5c106098f727
Tamaño del documento original: 1,13 Mo

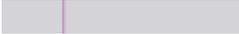
Depositante: DAVID CESAR LOZA MATOVELLE
Fecha de depósito: 22/2/2023
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 22/2/2023

Número de palabras: 8849
Número de caracteres: 57.687

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 repositorio.espe.edu.ec https://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/32461/T-ESPE-052480.pdf?sequence=1	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (38 palabras)
2	 Documento de otro usuario #6a23aa El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (20 palabras)
3	 www.nist.gov La Version en Español NIST https://www.nist.gov/calibrations/la-version-en-espanol	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (11 palabras)



Firmado electrónicamente por:
HERNAN VINICIO LARA
PADILLA

Ing. Hernán Lara Padilla, PhD
TUTOR



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Estudio de las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria”** fue realizado por la señorita **Jiménez Carrión, Cinthya Paola**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de febrero del 2023

Firma:



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

C. C: 0603247362



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Jiménez Carrión, Cinthya Paola**, con cédula de ciudadanía n° 1724690837, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Estudio de las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria** 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, 20 de febrero del 2023

Firma

.....
Jiménez Carrión, Cinthya Paola

C.C.: 1724690837



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo **Jiménez Carrión, Cinthya Paola**, con cédula de ciudadanía n° 1724690837, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Estudio de las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 20 de febrero del 2023

Firma

Jiménez Carrión, Cinthya Paola

C.C.: 1724690837

Dedicatoria

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Agradezco infinitamente todo el apoyo incondicional durante mi etapa universitaria.

Cinthy Jiméneez

Agradecimiento

A mi familia, que me ha brindado su apoyo incondicional para cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Y brindarme un soporte material y económico para continuar estudiando.

Un agradecimiento especial al Doctor Hernán Lara por su dedicación y paciencia como tutor. Gracias por su guía, consejos profesionales y transmitir sus vastos conocimientos científicos, los llevaré siempre presentes en mi futuro profesional.

Finalmente, gracias a todos mis docentes, compañeros y amigos.

Índice de contenido

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen	15
Abstract	16
Glosario de términos.....	17
Glosario de bloques de Grasshopper.....	18
Capítulo I	20
Introducción	20
Antecedentes	20
Justificación e importancia	23
Alcance del proyecto.....	24
Objetivos	26
Objetivo general	26
Objetivos específicos.....	26
Capítulo II	28
Revisión de Literatura	28
Manufactura Aditiva.....	28
Manufactura Aditiva usando Estereolitografía	29
Sistemas de coordenadas en manufactura aditiva	31
Aleatoriedad mediante diagramas de Voronoi.....	33
Estructuras porosas o celulares	35
Características importantes para caracterización de estructuras porosas	36

Características físicas y mecánicas	37
Permeabilidad.....	37
Capítulo III	39
Metodología	39
Desarrollo de la plataforma de productos	39
Diseño CAD de estructuras porosas mediante Grasshopper	39
Suavizado de malla	42
Combinación de parámetros definidos por el usuario	42
Acondicionamiento de estructuras porosas aleatorias	44
Manufactura aditiva de estructuras porosas aleatorias	45
Orientación de las probetas y ubicación de soportes en estructuras porosas	46
Orientación.....	46
Soportes para impresión de probetas porosas.....	47
Caracterización de estructuras porosas aleatorias	49
Estudio dimensional.....	49
Método de cálculo de porosidad teórica.....	50
Ensayo de permeabilidad en probetas porosas aleatorias	52
Prueba mecánica en estructuras porosas aleatorias.....	54
Análisis de deformación de estructuras porosas aleatorias	54
Validación con prueba conceptual.....	57
Capitulo IV	59
Resultados y Discusión.....	59
Estudio Dimensional.....	59
Porosidad teórica	62

Ensayo de Permeabilidad.....	64
Análisis de áreas de las estructuras porosas.....	66
Ensayo de compresión.....	69
Análisis de deformación 2D de las estructuras porosas	72
Análisis de validación conceptual.....	75
Conclusiones	77
Recomendaciones	78
Trabajo Futuro	79
Bibliografía.....	80
Apéndices.....	86

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Bloques empleados en la programación de estructuras porosas</i>	18
Tabla 2 <i>Probetas impresas para estudio mediante Estereolitografía</i>	50
Tabla 3 <i>Mediciones de probetas impresas vs diseño CAD con paredes.</i>	60
Tabla 4 <i>Análisis de Varianza diámetro de probetas.</i>	61
Tabla 5 <i>Análisis de Varianza altura de probetas</i>	62
Tabla 6 <i>Resultados obtenidos de porosidad teórica y reporte de MeshLab.</i>	63
Tabla 7 <i>Mediciones de tiempo que tarda en pasar el líquido a través del tipo de estructura porosa</i>	65
Tabla 8 <i>Resultados obtenidos del ensayo de compresión en las 3 probetas.</i>	72
Tabla 9 <i>Parámetros dinámicos obtenidos del ensayo DMA</i>	76

Índice de figuras

Figura 1	<i>Herramienta robótica con geometría suave y flexible para cirugía</i>	20
Figura 2	<i>Aplicaciones de Bioimpresión mediante Estereolitografía</i>	21
Figura 3	<i>Esquema de alcance del proyecto de investigación</i>	26
Figura 4	<i>Principio del proceso de manufactura aditiva</i>	28
Figura 5	<i>Categorías estandarizadas de MA por la ASTM 52900</i>	29
Figura 6	<i>Diagrama esquemático de impresión por estereolitografía</i>	31
Figura 7	<i>Máquina genérica de manufactura aditiva</i>	32
Figura 8	<i>Regla de la mano derecha para rotaciones positivas con referencia al origen de prototipo de impresión</i>	32
Figura 9	<i>Orientaciones posibles sobre la plataforma de fabricación</i>	33
Figura 10	<i>Diagramas Voronoi 2D con 10 puntos</i>	34
Figura 11	<i>Tipos de diseños de andamios porosos</i>	36
Figura 12	<i>Diseño paramétrico de estructura porosa aleatoria mediante Grasshopper</i>	41
Figura 13	<i>Suavizado de malla con algoritmo de Catmull-Clark</i>	42
Figura 14	<i>Esquema gráfico de geometría y elementos principales de la estructura</i>	43
Figura 15	<i>Parámetros constantes de Multipipe</i>	43
Figura 16	<i>Probetas con aros para ensayo de permeabilidad a) y b) paredes para ensayos mecánicos</i>	44
Figura 17	<i>Dimensiones finales del CAD de probetas porosas con a) paredes b) aros</i>	45
Figura 18	<i>Diagrama de procesos de preprocesamiento, impresión y post-procesamiento de estructuras porosas mediante SLA</i>	46
Figura 19	<i>Orientación de probetas en la plataforma de impresión Preform</i>	47
Figura 20	<i>Generación de soportes internos y externos en las estructuras</i>	48
Figura 21	<i>Probetas cúbicas para pruebas de imprimibilidad, lado 25 mm</i>	49

Figura 22	<i>Filtros aplicados en MeshLab para analizar la estructura porosa</i>	51
Figura 23	<i>Representación gráfica del volumen del cilindro y mallado de la estructura</i>	52
Figura 24	<i>Acondicionamiento del experimento de permeabilidad para la estructura porosa</i>	53
Figura 25	<i>Esquema de realización del experimento de permeabilidad</i>	53
Figura 26	<i>Ensayo de compresión uniaxial en estructura porosa aleatoria</i>	54
Figura 27	<i>Esquema de adquisición de imágenes para su posterior procesamiento</i>	55
Figura 28	<i>Esquema de medición de distancia de dos puntos</i>	56
Figura 29	<i>Aplicaciones de estructuras porosas (Scaffolds) en ingeniería de tejido óseo</i>	57
Figura 30	<i>Probetas cilíndricas con aros de \varnothing 25 mm con 3 tipos de cantidad de puntos</i>	59
Figura 31	<i>Probetas cilíndricas con paredes de 2 mm de espesor y \varnothing 25mm</i>	59
Figura 32	<i>Gráfica de mediciones de diámetro y altura de 3 tipos de probetas con aros</i>	60
Figura 33	<i>Gráfica de intervalos para el diámetro de las probetas</i>	61
Figura 34	<i>Gráfica de intervalos de altura de las muestras de cada probeta</i>	62
Figura 35	<i>Gráfica de dispersión de % Porosidad vs Número de puntos (N)</i>	63
Figura 36	<i>Inestabilidad de la estructura porosa aleatoria</i>	64
Figura 37	<i>Gráfica de intervalos de tiempo vs porosidad</i>	65
Figura 38	<i>Retención del fluido en el interior de la estructura porosa S3</i>	66
Figura 39	<i>Seccionamiento de probeta de 30 puntos en el eje x, y y z</i>	66
Figura 40	<i>Seccionamiento de probeta de 65 puntos en el eje x, y y z</i>	67
Figura 41	<i>Seccionamiento de probeta de 100 puntos en el eje x, y y z</i>	67
Figura 42	<i>Gráficas de áreas de estructura aleatoria flexible de 30 puntos</i>	68
Figura 43	<i>Gráficas de áreas de estructura de 65 puntos</i>	68
Figura 44	<i>Gráfica de áreas de estructura de 100 puntos</i>	69
Figura 45	<i>Configuración del ensayo en interfaz TRIOS</i>	70
Figura 46	<i>Curvas de comportamiento mecánico de las probetas porosas y sólida</i>	70

Figura 47 <i>Respuestas a la compresión de estructuras porosas flexibles con diferente número de puntos bajo una deformación creciente del 0% al 70% (escala: 5 mm).</i>	71
Figura 48 <i>Distancia conocida y nodos de referencia para determinar el desplazamiento.</i>	73
Figura 49 <i>Gráfica Deformación - Distancia de 3 tipos de estructuras</i>	74
Figura 50 <i>Gráfica de deformación de estructuras porosas aleatorias mediante procesamiento de imágenes.</i>	74
Figura 51 <i>Gráfica de Módulo de almacenamiento y pérdida con un barrido de frecuencia en probetas porosas</i>	75

Resumen

Las estructuras porosas aleatorias están presentes en un sin número de formas de la naturaleza como en un hueso o esponja. Obtener este tipo de estructuras resulta un reto por el nivel de detalle y complejidad estructural, existen algunas formas de modelamiento entre ellas están la optimización topológica, los diagramas Voronoi, o patrones con diferentes formas. En aplicaciones prácticas de materiales porosos, no solo se requiere de una conectividad tridimensional adecuada de la red de la estructura, sino también de una alta porosidad y tamaño del poro adecuado.

El objetivo del presente estudio es diseñar, fabricar y caracterizar estructuras poliméricas con porosidad aleatoria en resina elástica 50 A. El diseño es de tipo paramétrico, lo que significa que se pueden obtener varios modelos gracias a la combinación de parámetros de entrada que pueden modificarse en caso de observar fallas en la previsualización de la estructura. Para la fabricación de las estructuras porosas se emplea el método de Estereolitografía (SLA), se consideraron parámetros como la orientación, ubicación de soportes de impresión y el manejo de tiempo de limpieza y curado. Finalmente, se obtuvieron las estructuras con porosidades de 91.0%, 84.5% y 79% de 30, 65 y 100 puntos, respectivamente. Los ensayos aplicados a las estructuras evalúan permeabilidad experimental, deformación y resistencia mecánica. Con el modelo CAD se determinó la porosidad teórica y el área de superficie mediante el rebanado de la estructura porosa.

Los resultados revelan que al cambiar el número de puntos que se distribuyen de forma aleatoria en la geometría, las celdas Voronoi son de menor tamaño, cambia la porosidad de las estructuras, controlando la permeabilidad y las propiedades mecánicas de las estructuras facilitando su caracterización.

Palabras clave: Voronoi, SLA, permeabilidad, porosidad

Abstract

Random porous structures are present in a number of natural forms such as bone or sponge. To obtain this type of structures, they are modeled in several ways including topological optimization and Voronoi diagrams. In practical applications of porous materials, not only a proper three-dimensional connectivity of the network structure is required, but also a high porosity and adequate pore size.

The objective of the present study is to design, fabricate and characterize polymeric structures with random porosity in elastic resin 50A. The design is of parametric type, which means that several models can be obtained thanks to the combination of input parameters that can be modified in case of observing failures in the preview of the structure. For the fabrication of the porous structures, the Stereolithography (SLA) method is used, parameters such as orientation, location of printing supports and cleaning and curing time management were considered. Finally, structures with porosities of 91.0%, 84.5% and 79% of 30, 65 and 100 points, respectively, were obtained. The tests applied to the structures evaluate experimental permeability, deformation and mechanical resistance. With the CAD model, the theoretical porosity and surface area were determined by slicing the porous structure.

The results reveal that by changing the number of points that are randomly distributed in the geometry, the Voronoi cells are smaller in size, changes the porosity of the structures, controlling the permeability and mechanical properties of the structures facilitating their characterization.

Keywords: Voronoi, SLA, permeability, porosity.

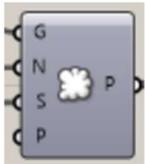
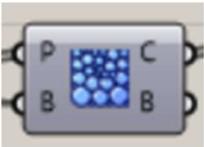
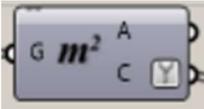
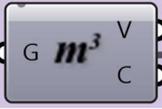
Glosario de términos

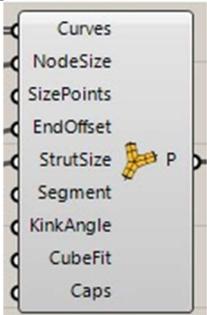
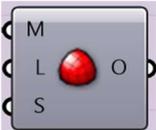
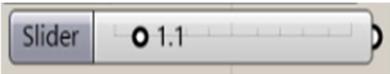
Término	Significado
Brep	Boundary Representation B- rep es un término empleado en Grasshopper que se refiere a los límites de una geometría forma por superficies o polisuperficies.
STL	Es un formato estándar para modelos 3D, cuya geometría se describe mediante un mallado de triángulos
ε	Deformación (%)
σ	Esfuerzo medido en MPa
μm	Micrómetros
%P	Porcentaje de porosidad
DMA	Análisis dinámico mecánico
E'	Módulo de almacenamiento
E''	Módulo de pérdida
ρ	Densidad

Glosario de bloques de Grasshopper

Tabla 1

Bloques empleados en la programación de estructuras porosas

Bloque	Nombre	Función
	Cylinder	Crea una superficie cilíndrica
	Cap Holes	Cubre con tapas los huecos de una superficie o <i>Brep</i>
	Populate Geometry	Rellena de puntos una geometría
	Voronoi 3D	Diagrama volumétrico de Voronoi para una colección de puntos
	Solid Intersection	Realiza una intersección sólida en dos conjuntos <i>Brep</i>
	Deconstruct Brep	Deconstruye un <i>Brep</i> en sus partes constituyentes
	Area	Determina el área para <i>Breps</i> , mallas y curvas planas cerradas.
	Volumen	Determina el volumen de <i>Breps</i> y mallas cerradas
	Line	Crea una línea entre dos puntos

Bloque	Nombre	Función
	Multipipe	Crea una tubería ramificada alrededor de una red de líneas/curvas
	Catmull-Clark Subdivision	<p>La Subdivisión Catmull Clark introdujo la opción de modificar el suavizado de los vértices basados en caras, aristas y vértices en formas cuadrangulares.</p> <p>Representa una colección de geometría de malla. En Rhino, las mallas están formadas únicamente por triángulos y cuadrángulos. Las mallas siempre contienen una matriz de vértices, una matriz de normales (una por cada vértice) y una matriz de caras.</p>
	Mesh	<p>Representa una colección de geometría de malla. En Rhino, las mallas están formadas únicamente por triángulos y cuadrángulos. Las mallas siempre contienen una matriz de vértices, una matriz de normales (una por cada vértice) y una matriz de caras.</p>
	Custom Preview	Permite previsualizar la geometría y asignarle un color
	Sliders	Permite ingresar valores enteros, o flotantes dentro del rango configurado a otros bloques

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Los materiales avanzados (por ejemplo, materiales funcionales y materiales inteligentes) en combinación con los sistemas mecatrónicos aumentan la flexibilidad y el rendimiento de estos sistemas integrados que funcionan en diversas aplicaciones existentes o nuevas aplicaciones en el campo de la ciencia, la ingeniería y la tecnología en general. Estos sistemas avanzados utilizan las propiedades funcionales de los materiales avanzados para lograr un alto rendimiento con capacidades de reconocimiento, discriminación y ajuste en respuesta a un cambio de su entorno. Por ejemplo, los sistemas de simulación quirúrgica requieren materiales con características físicas y comportamiento similares a las estructuras del cuerpo humano. De igual forma, se requieren dispositivos para nuevas herramientas de cirugía y así, descubrir el uso óptimo de las nuevas características funcionales para varios tipos de operaciones.

Figura 1

Herramienta robótica con geometría suave y flexible para cirugía



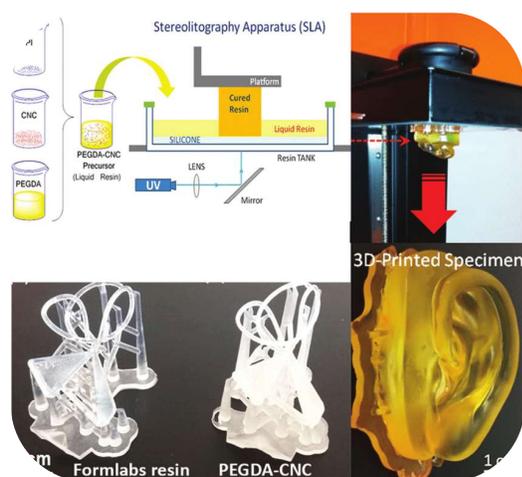
Nota. Desarrollo de materiales avanzados para instrumentos mecatrónicos. Tomado de *Robin Heart surgical robot: Description and future challenges*, por Nawrat, 2020, Elsevier.

La fabricación de materiales avanzados con estructuras complejas puede obtenerse gracias a métodos sofisticados de manufactura aditiva. Nuevos diseños estructurales, simulaciones avanzadas y técnicas de modelado mecánicas deben usarse en la hoja de ruta respectiva.

Por ejemplo, materiales avanzados como los materiales celulares multi-escala permiten aplicaciones no vistas en materiales convencionales tales como altas tasas de difusión y transporte de masa, relaciones peso vs rigidez conveniente, entre otras. Estos nuevos materiales y sus estructuras complejas pueden fabricarse empleando técnicas como la estereolitografía.

Figura 2

Aplicaciones de Bioimpresión mediante Estereolitografía



Nota. La Estereolitografía emplea un amplio rango de materiales que permiten fabricar un sin número de prototipos mecánicos y médicos. Tomado de *3D Bioprinting of Lignocellulosic Biomaterials*, por Shavandi et al., 2020, *Advanced Healthcare Materials*.

Las estructuras celulares han mostrado tener gran potencial en diversas áreas de la ingeniería como en el sector automotriz, aeroespacial, robótica y biomédica. Generalmente, se clasifican en estructuras estocásticas y no estocásticas (periódicas) y estas a su vez ser de

celda cerrada o celda abierta (Park et al., 2021). Las propiedades de las estructuras celulares (mecánicas, térmicas, acústicas, etc.) están determinadas por el tipo de red y otros parámetros de diseño, como el tamaño de la celda unitaria y el grosor de las vigas o superficies.

Particularmente, las estructuras estocásticas o espumas se caracterizan por un cambio aleatorio y no periódico. Presentan propiedades dispersas que determinan que su comportamiento sea impreciso (Pelanconi et al., 2020). Existe una gran cantidad de sistemas biológicos en la naturaleza que presentan este tipo de estructuras, uno de los más significativos es el hueso (Fantini & Curto, 2018). Para generar este tipo de estructuras se emplean métodos como diagramas de Voronoi o superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS), donde la porosidad se construye variando parámetros en sus expresiones matemáticas, algoritmos o la distribución de puntos en el plano.

El gran potencial de la estructura Voronoi como herramienta computacional de diseño ha hecho posible optimizar la topología de estructuras arquitectónicas y mejorar el rendimiento mecánico, térmico y estructural en prototipos de ciencia y tecnología. Recientemente, salió al mercado un casco de bicicleta con estructura 3D Voronoi (Zhecheng & Yuefeng, 2020), su característica porosa le brinda un equilibrio entre ligereza y seguridad.

Para obtener este tipo de estructuras complejas, comúnmente, se emplean tecnologías de manufactura aditiva como la fotopolimerización o la fusión selectiva por láser (popularmente conocido como estereolitografía), que brindan la posibilidad de personalizar el modelo, reducir costos y alta calidad en el acabado.

Entre los estudios más relevantes que se enfocan en estructuras porosas estocásticas, se encuentra el *Diseño, fabricación y propiedades de tracción de estructuras metálicas porosas estocásticas* (Simoneau et al., 2016), en el mismo se señala una nueva metodología para fabricar y analizar estructuras porosas estocásticas de células abiertas de polvos de aleación de cobalto-cromo mediante la tecnología de fusión selectiva por láser (SLM), sometidas a tensión uniaxial hasta la rotura para determinar resistencia mecánica y rigidez. De igual forma,

se encuentra la *Investigación numérica de la conductividad térmica efectiva de estructuras celulares basadas en puntales diseñadas por teselación espacial de Voronoi* (Zhang et al., 2020), que realiza una caracterización de probetas de acuerdo al número y disposición de puntos semilla en relación a diferentes cambios térmicos.

Una de las aplicaciones más estudiadas de las estructuras Voronoi en los últimos años obedece a las aplicaciones en biomedicina y bioingeniería conocidas como andamios (*scaffolds*) (Herath et al., 2021), (Gómez et al., 2016) y (Fantini et al., 2016).

Los pocos estudios que existen se han enfocado en el diseño de las estructuras usando diferentes algoritmos computacionales (Feng et al., 2018). Por tanto, aún existen diversas áreas de oportunidad a ser exploradas en aspectos de ingeniería y biomedicina.

Justificación e importancia

En la actualidad, medir y correlacionar eficazmente las propiedades y el comportamiento de los materiales requiere de herramientas de caracterización adecuadas (Pellegrino et al., 2016). Especialmente, en estructuras celulares no convencionales sigue siendo un tema abierto, dada su complejidad geométrica.

La exploración de materiales con porosidad aleatoria es de vital importancia en el desarrollo de ciencia y tecnología. La revisión de literatura refleja que la estructura Voronoi no sólo beneficia al comportamiento mecánico sino también a propiedades como conductividad térmica, densidad relativa y otras.

Determinar la relación entre la ubicación, número de puntos semilla y la porosidad junto con sus propiedades mecánicas es una condición previa para elaborar un diseño de producto que proporcione propiedades superiores. Por tanto, desarrollar una plataforma de productos que conste de propiedades físicas (porosidad, región, número y ubicación de puntos semilla y nivel de suavidad) y mecánicas como resistencia mecánica y deformación, determinadas bajo estándares e investigaciones internacionales, fabricadas mediante estereolitografía, permitirá a

diseñadores tener una visión amplia de las posibilidades de aplicar estructuras porosas Voronoi en prototipos innovadores, como en el campo de robótica blanda o ingeniería de tejido, brindando características superiores como seguridad, confiabilidad y flexibilidad que modelos tradicionales.

Siguiendo las recomendaciones del reporte sobre la hoja de ruta para manufactura aditiva de polímeros del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés) (Pellegrino et al., 2016), en el presente proyecto se abordarán los siguientes aspectos:

- Desarrollar un modelo predictivo para correlacionar las propiedades de las fotoresinas con los parámetros del proceso de estereolitografía para generar piezas con porosidad aleatoria con propiedades aceptables.
- Desarrollar un modelo de predicción de las propiedades mecánicas de la pieza final a partir de las características iniciales de la resina fotocurada.
- Obtener datos para la entrada en modelos predictivos y simulaciones.
- Establecer métricas de caracterización y morfología de las estructuras porosas.

A través de la importancia de establecer estos aspectos como relevantes, se espera obtener los siguientes resultados:

- Capacidad para imprimir partes con estructura porosa aleatoria con elevada confiabilidad.
- Proceso de fabricación mediante estereolitografía con materiales que requieren reducido post-procesado, y
- Alta predicción de propiedades de las estructuras porosas aleatorias.

Alcance del proyecto

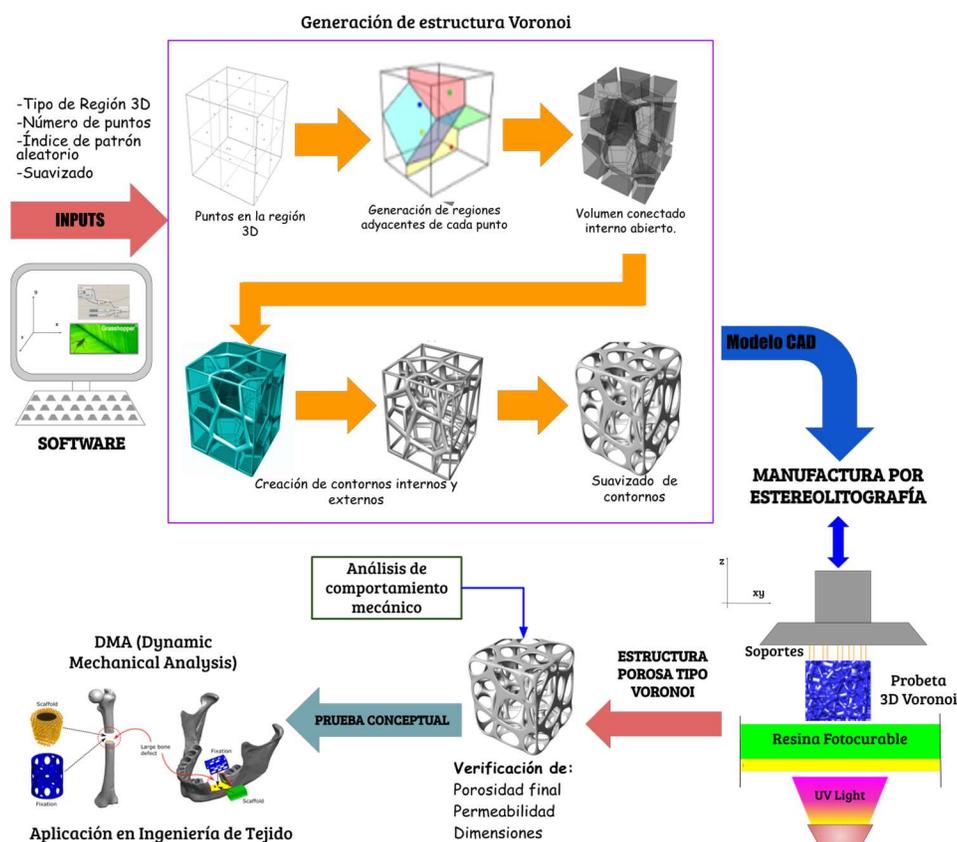
El alcance del estudio se centra en el análisis de varios parámetros asociados a estructuras porosas que permitan caracterizarlas. Para el efecto, se desarrollará un algoritmo de

generación de estructuras poliméricas aleatorias que permita manipular varios parámetros para obtener varias configuraciones que puedan ser analizadas y predecir su comportamiento. Los ensayos propuestos para evaluar las estructuras porosas aleatorias son: determinar porcentaje de porosidad, evaluar la permeabilidad, verificar dimensiones de la impresión vs su diseño CAD. Finalmente, se ejecutará un ensayo mecánico de compresión para determinar parámetros como deformación, resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de cada tipo de estructura. De forma complementaria, se realizará una prueba conceptual que se orienta a la ingeniería de tejidos, sometiendo a las probetas a condiciones semejantes a las expuesta a los andamios porosos para regeneración celular, ubicados en zonas del cuerpo humano como rodilla, muñecas o mandíbula. Por su ubicación, las estructuras porosas deben cumplir con propiedades mecánicas específicas.

De manera general, el esquema del alcance del trabajo es el siguiente:

Figura 3

Esquema de alcance del proyecto de investigación



Nota. Se puede observar de forma esquemática el alcance de trabajo de integración curricular, empezando por el diseño y manufactura hasta la caracterización y análisis.

Objetivos

Objetivo general

Estudiar las aplicaciones de manufactura aditiva en materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria.

Objetivos específicos

- Desarrollar una plataforma de productos para aplicaciones de materiales estructurales con porosidad aleatoria.

- Diseñar y fabricar probetas de materiales poliméricos estructurales con porosidad aleatoria usando impresión 3D.
- Evaluar factores de comportamiento mecánico de las probetas usando diseño experimental.
- Analizar el comportamiento de la deformación de las probetas sometidas a cargas de compresión mediante visión artificial.
- Desarrollar una prueba conceptual orientada en la ingeniería de tejidos con análisis mecánico dinámico.

Capítulo II

Revisión de Literatura

Manufactura Aditiva

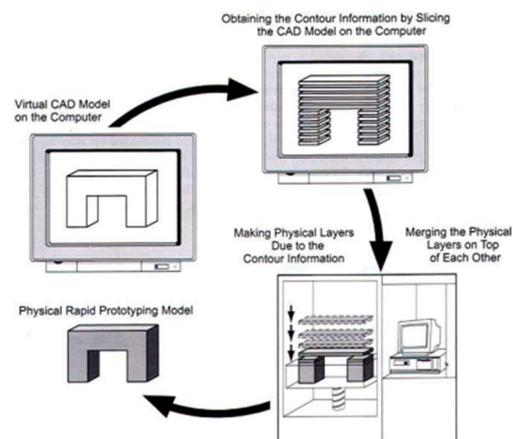
Manufactura aditiva (MA) es el término formal para prototipado rápido (Rapid Prototyping, RP). A diferencia de los métodos tradicionales de manufactura que remueven o eliminan material, los procesos de manufactura aditiva construyen un objeto tridimensional agregando material capa por capa directamente a partir del diseño CAD de la pieza (Figura 4).

Actualmente, la MA está presente en varios campos del sector industrial, biomedicina, aeroespacial, entre otros (Pérez et al., 2020). Sin embargo, para que la presencia de la MA abarque todos los sectores, se requiere de más estudios que evalúen y controlen parámetros del proceso de impresión y propiedades mecánicas, físicas o eléctricas que pueden verse afectadas por la orientación o velocidad de fabricación de las piezas (Pellegrino et al., 2016).

Este proceso de manufactura facilita la obtención de geometrías complejas en un amplio rango de materiales (resinas, cerámicos, polímeros y metales) (Bourell et al., 2017).

Figura 4

Principio del proceso de manufactura aditiva.

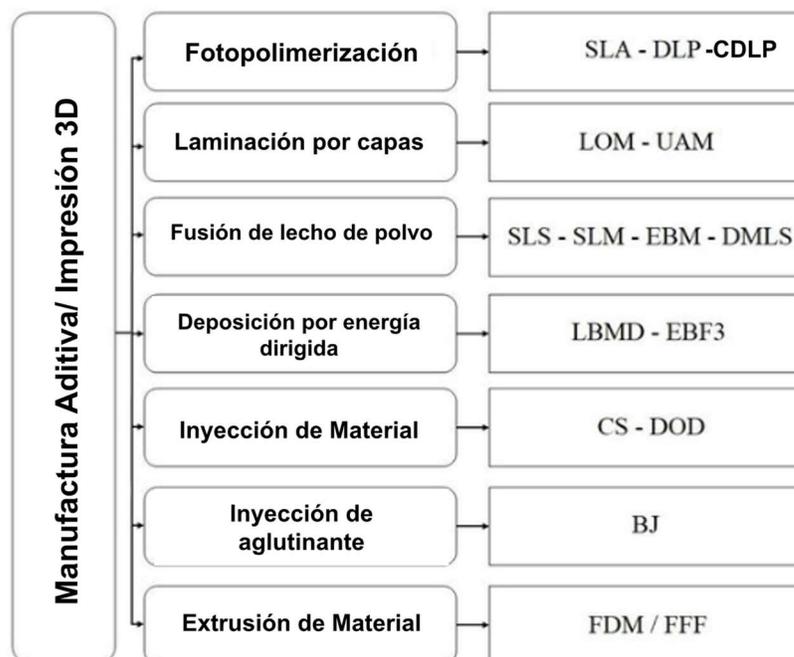


Nota. Se observa en la figura los pasos principales de manufactura aditiva. Tomado de *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing*, por Prakash, 2018, *Materials Today: Proceedings*

Según lo definido por ISO/ASTM 5290, la manufactura aditiva se clasifica en siete grupos: polimerización en cuba, fusión por lecho de polvo, deposición de energía dirigida, laminación por capas, inyección de aglutinante, extrusión e inyección de materiales.

Figura 5

Categorías estandarizadas de MA por la ASTM 52900



Nota. Cada categoría cuenta con varios métodos que se diferencian por el tipo de material de fabricación y la máquina. Tomado de *Multi-metal 3D printing with extrusion method*, por Mousapour, 2020, ResearchGate.

Manufactura Aditiva usando Estereolitografía

La tecnología de estereolitografía (SLA) se encuentra en la categoría de fotopolimerización en cuba, junto con otras como procesamiento de luz digital (DLP) y procesamiento de luz digital continua (CDLP), se diferencian principalmente por el método de curado de la resina. Para SLA, se emplea láseres; en el caso de DLP, se utiliza un proyector que cubre toda el área de impresión. Y el método CDLP, emplea LEDs y oxígeno.

Charles Hull experimentó con materiales exponiéndolos a un barrido de láser UV, similar al sistema de las impresoras láser. Obteniendo una pieza sólida en 3D producto de curar una capa sobre la anterior (Gibson et al., 2021).

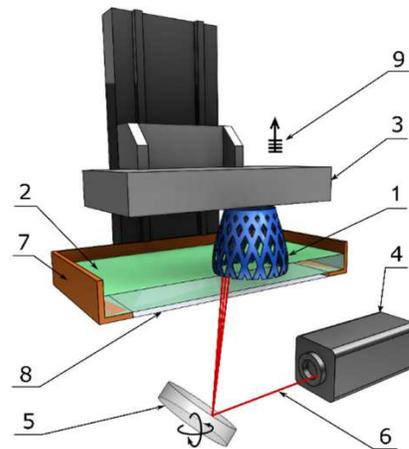
El material utilizado en el proceso de fotopolimerización, es una resina fotocurable que se almacena en una tina que se expone a una luz UV (Figura 6). Esta luz desencadena la reacción de polimerización, que crea cadenas de polímeros para formar una resina sólida. Este proceso químico-térmico es irreversible y los modelos no vuelven a cambiar a resina líquida viable.

En SLA, el láser va curando punto por punto el área del modelo STL. Por tanto, la precisión de impresión se relaciona con el diámetro de rayo láser, en el punto de curado. Por ejemplo, para una Formlabs Form 2 SLA, el tamaño del punto es de 140 μm . Mientras que, para una Form 3 SLA 85 μm (*Form 3 o Form 2, s/f*). Otro parámetro del proceso de SLA es la altura de capa, este valor determina la altura que sube o baja la plataforma de fabricación luego de formada una capa y mantiene esta altura hasta completar el modelo 3D. En la práctica, 100 μm es la altura más elegida. De acuerdo al software de pre procesamiento de Formlabs, dependiendo del tipo de resina, se pueden configurar alturas de 25 o 50 μm .

En el mercado de resinas fotocurables, se pueden encontrar desde resinas estructurales a flexibles. Éstas últimas son objeto de estudio en este trabajo. Las resinas elásticas se comportan de manera similar a los elastómeros de poliuretano (PU) (Florez et al., 2008). Se caracterizan por su alta flexibilidad y deformación antes de la rotura (Formlabs, 2019).

Figura 6

Diagrama esquemático de impresión por estereolitografía



Nota. Los componentes típicos de una máquina de SLA son: 1. Parte impresa 2. Resina fotocurable 3. plataforma de fabricación 4. Fuente de láser UV 5. Espejo de escaneo 6. Rayo láser 7. Tanque de resina 8. Lámina 9. Dirección de fabricación. Tomado de *A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing*, por Pagac, 2021, Polymers.

Sistemas de coordenadas en manufactura aditiva

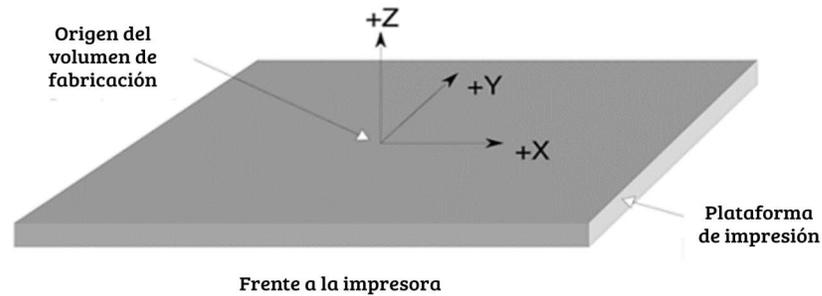
Con el fin de estandarizar y unificar la terminología en el campo de manufactura aditiva, la ASTM 52921 describe un sistema de coordenadas para orientar las piezas en la plataforma de impresión, esta nomenclatura se emplea para indicar la orientación de estructuras porosas en la plataforma de impresión.

La reorientación de las partes será especificada mediante la rotación alrededor del centro geométrico de la parte en la secuencia A, B y C (Figura 8). Solo los ángulos que no son cero deben ser especificados (Figura 9).

El sentido de los ángulos se establece siguiendo la regla de la mano derecha, alrededor de cada eje (Figura 8).

Figura 7

Máquina genérica de manufactura aditiva

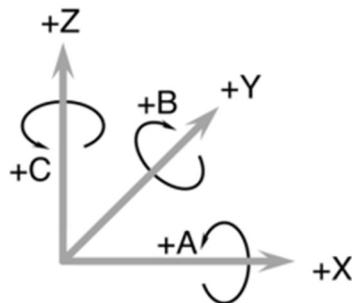


Nota. Se indica el origen y sistema de coordenadas estandarizadas para impresión 3D.

Tomado de *Standard terminology for additive manufacturing*, por ASTM 52921, 2013, ISO.

Figura 8

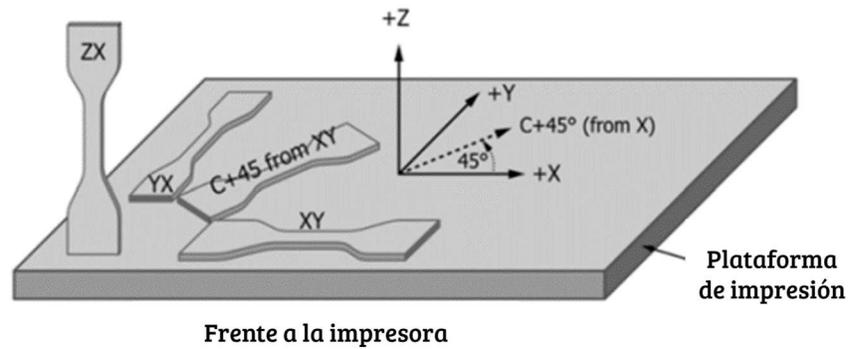
Regla de la mano derecha para rotaciones positivas con referencia al origen de prototipo de impresión



Nota. Se muestra la nomenclatura para orientación de los modelos en la plataforma de impresión. Tomado de *Standard terminology for additive manufacturing*, por ASTM 52921, 2013, ISO.

Figura 9

Orientaciones posibles sobre la plataforma de fabricación



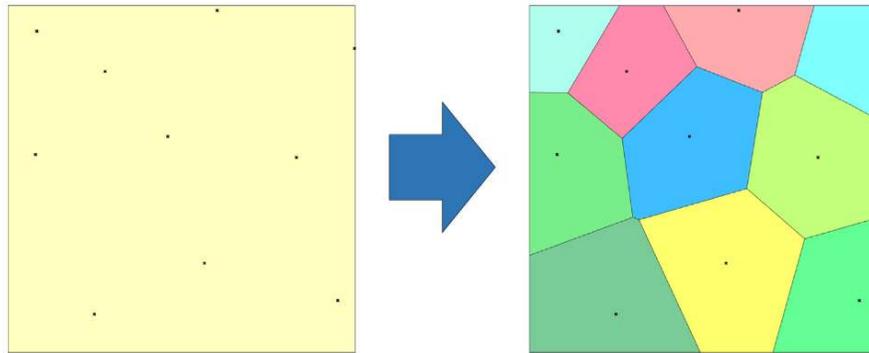
Nota. Ejemplificación de orientaciones con probetas normalizadas. Tomado de *Standard terminology for additive manufacturing*, por ASTM 52921, 2013, ISO.

Aleatoriedad mediante diagramas de Voronoi

El diagrama de Voronoi o teselación Voronoi permite la partición de una región en celdas basado en un conjunto discreto de puntos dispersos dentro de ella de forma aleatoria o no, los llamados puntos semilla. En este caso, una celda comprende todos los puntos que sólo están más cerca del punto semilla del que se originó la celda. La teselación de Voronoi o diagrama de Voronoi, introducida inicialmente en el espacio 2D (Figura 10), se ha aplicado a dimensiones superiores. Las celdas de Voronoi creadas mediante la partición de una región euclidiana en 3D adoptarán la estructura de una colección de poliedros (Herath et al., 2021).

Figura 10

Diagramas Voronoi 2D con 10 puntos



Nota. Esta figura representa como se construye el Voronoi en una superficie plana, este mismo concepto se aplica para Voronoi 3D, donde sus celdas son poliédricas. Tomado de *Mechanical and geometrical study of 3D printed Voronoi scaffold design for large bone defects*, por Herath, 2021, Materials & Design.

Este tipo de diagrama ha ganado recientemente atención, ya que es una estructura tridimensional o bidimensional no repetitiva (Friedrich, 2008). La geometría del Voronoi se forma partiendo de una nube de puntos en el plano 2D o 3D, los mismos se unen mediante rectas formando polígonos cuyo circuncentro delimitará la región de vecindad o adyacencia de cada punto inicial. Es decir, su forma dependerá de la cantidad y ubicación de los puntos o puntos semillas dentro del plano o espacio, haciendo que su estructura sea muy sensible al más mínimo cambio de posición de cualquiera de los puntos (Shahabi & Sharifzadeh, 2009) e influir en el rendimiento anisotrópico del material. Estas características hacen que sea categorizada como una técnica paramétrica de diseño (Du et al., 1999). Numéricamente, los centroides Voronoi se expresa como:

Ecuación 1

$$\hat{V}_i = \{x \in W \mid |x - z_i| \leq |x - z_j| \text{ for } j = 1, \dots, k, j \neq i, \text{ donde la igualdad solo es válida para } i < j\}$$

Donde

$W = \text{conjunto discreto de puntos en } \mathbb{R}^N$

$z_i = \text{conjunto de puntos hasta } k$

Estructuras porosas o celulares

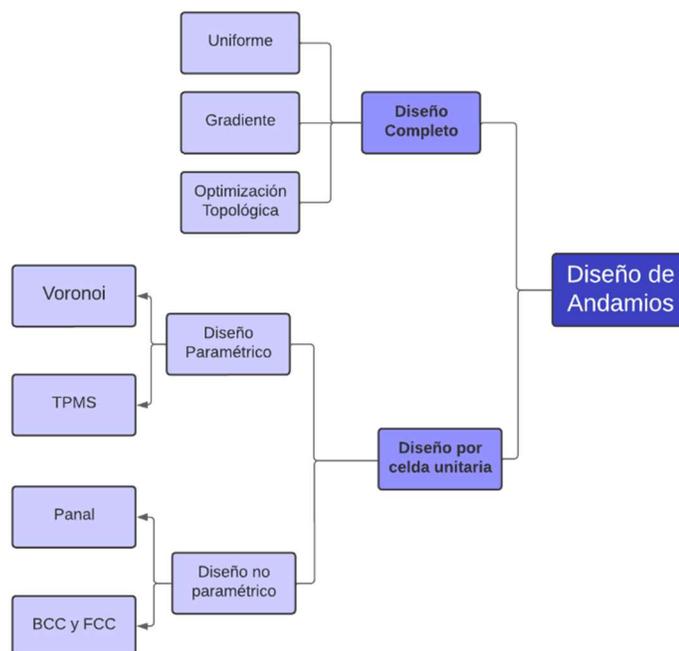
Dentro de las estructuras de topología compleja, se encuentran las estructuras porosas, reticulares, celulares, etc., estas formas se observan en la naturaleza como huesos, corchos o alas de insectos (Feng et al., 2018). Actualmente, el desafío es diseñar y optimizar estas estructuras geoméricamente, de tal forma que sea posible aprovechar sus propiedades mecánicas para diversas aplicaciones. Una aplicación prometedora de estas estructuras es como andamios, se fabrican en materiales degradables; mejoran la regeneración de tejidos a través de la administración de nutrientes y productos biológicos.

Las estructuras de este tipo tienen muchas ventajas debido a su capacidad para proporcionar ligereza, alta resistencia específica y materiales de absorción de impactos (Nguyen & Vignat, 2016). Además, también pueden adaptarse para absorber el sonido, disipar el calor, aislar las vibraciones y absorber la energía (Feng et al., 2018).

De acuerdo a (Kanwar & Vijayavenkataraman, 2021), este tipo de estructuras pueden diseñarse de la siguiente manera:

Figura 11

Tipos de diseños de andamios porosos



Nota. Clasificación general de diseño de andamios. Tomado de *Porous Scaffold Design for Additive Manufacturing in Orthopedics: A Review*, por Chen, 2020, Bioengineering and Biotechnology.

Características importantes para caracterización de estructuras porosas

Las características que se evalúan en un estructura o andamio poroso, dependerán de la aplicación. Generalmente, en el campo de la ingeniería de tejidos se caracterizan propiedades como porosidad, permeabilidad y arquitectura, con el fin de hallar la estructura que mejor se adapte a los requerimientos de la ubicación del tejido (Gómez et al., 2016).

En la evaluación comparativa de manufactura aditiva, se encuentran detalladas algunas características físicas y mecánicas que comúnmente se reportan sobre el producto final impreso como densidad, porosidad, dimensiones de las piezas finales y con respecto a

ensayos mecánicos se evalúa principalmente, tensión, torsión y compresión para determinar varias características mecánicas como módulo de Young o esfuerzo último (Chua et al., 2017).

Características físicas y mecánicas

De acuerdo a Chua, las dimensiones de las partes pueden ser medidas simplemente usando un calibrador o regla. Para una mejor precisión, se puede medir tomando imágenes a nivel microscópico. Estudios previos sobre el comportamiento anisotrópico del material en la manufactura aditiva, revelan que la orientación de la impresión tiene estrecha relación con las dimensiones finales del producto, el acabado y en su comportamiento mecánico.

Otra métrica importante dentro de las estructuras impresas mediante manufactura aditiva es la medición de la porosidad. Existen métodos como el principio de Arquímedes para hallar la porosidad de forma experimental. Y métodos matemáticos, como la relación de densidades del andamio poroso, determinando el peso y volumen del andamio.

Ecuación 2

$$\rho_{andamio} = \left(\frac{\text{peso}_{andamio}}{\text{Volumen}_{andamio}} \right)$$

$$\text{porosidad} = 1 - \rho_{relativa}$$

Permeabilidad

La permeabilidad es una medida de la facilidad de flujo de un fluido a través de un sólido poroso. Se han desarrollado varios bancos de pruebas experimentales para determinar la permeabilidad de los andamios, aplicando diferentes métodos de medición. Estos pueden dividirse en métodos directos e indirectos.

Los métodos directos cuantifican la permeabilidad midiendo la caída de presión y el caudal volumétrico a través del andamio basándose en la ley de Darcy (Ecuación 3) que se encuentra normalizada por la ASTM F2952.

Ecuación 3

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k} \left(\frac{Q}{A} \right)$$

ΔP = diferencia de presión a través del andamio

Q = Caudal

A = área de la superficie del andamio expuesta al fluido

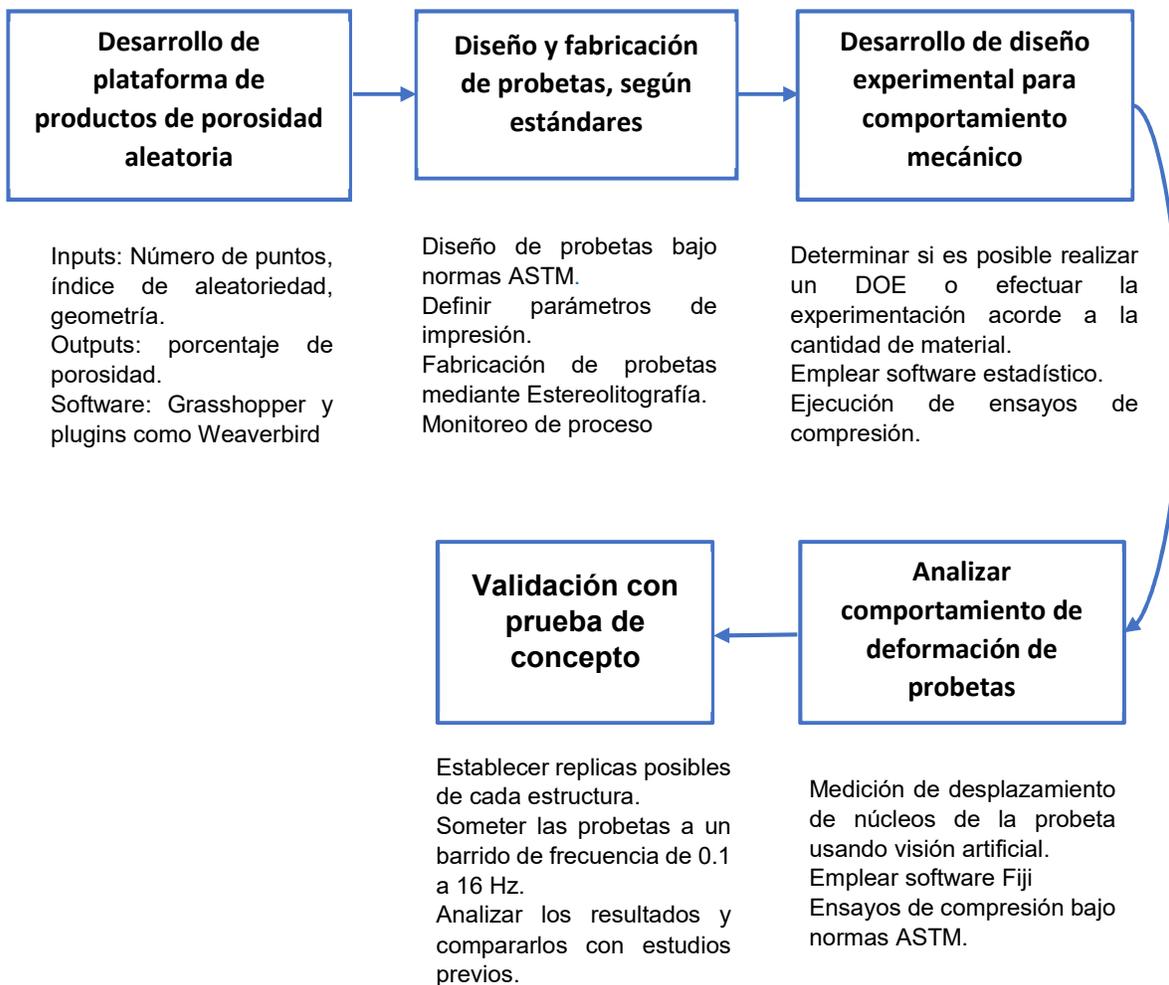
μ = viscosidad del fluido

k = coeficiente de Darcy

Capítulo III

Metodología

La metodología engloba desde el diseño y fabricación hasta la evaluación de características como permeabilidad, porcentaje de porosidad, y comportamiento mecánico que facilite la caracterización de las estructuras porosas. Se presenta el esquema metodológico:



Desarrollo de la plataforma de productos

Diseño CAD de estructuras porosas mediante Grasshopper

Grasshopper (David Rutten, Barcelona) es una poderosa herramienta de diseño paramétrico que funciona con Rhino (Robert McNeel & Associates, Barcelona), se basa en un lenguaje de programación visual que relaciona los parámetros con todas las funciones

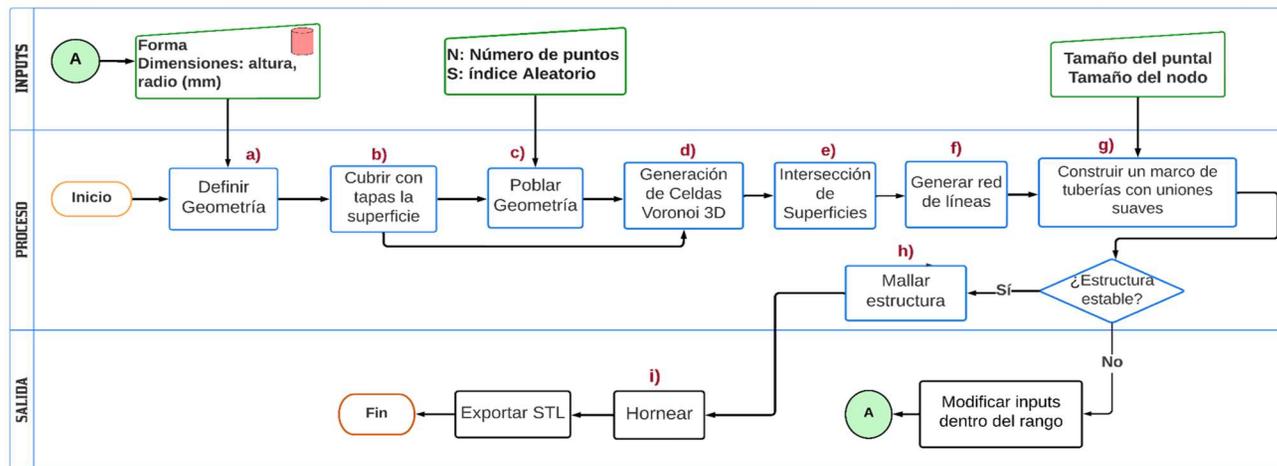
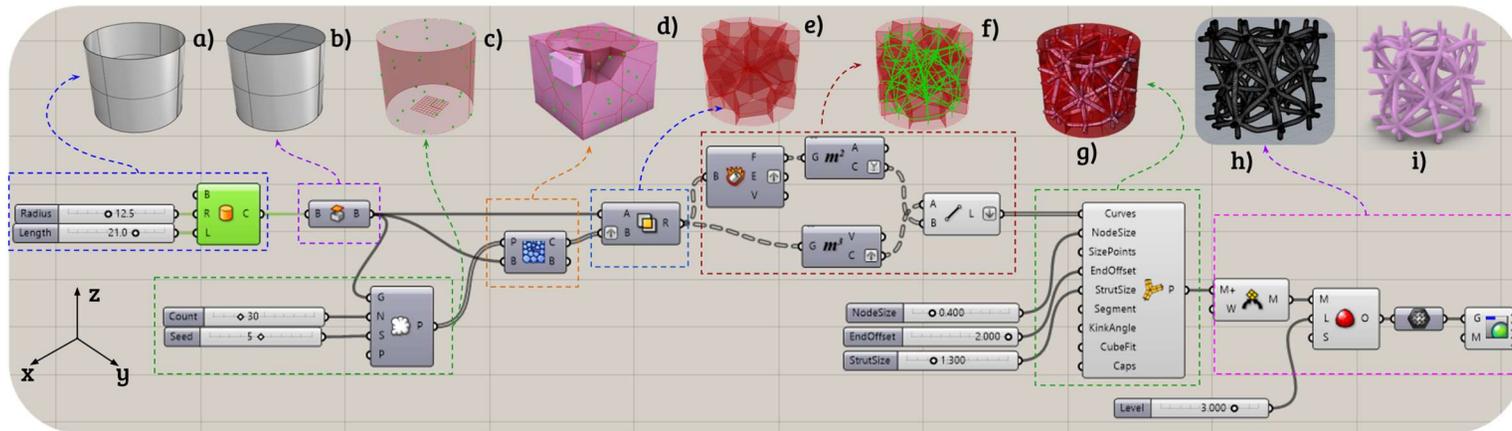
conectadas y definidas por el usuario, concluyendo normalmente en la generación de la geometría visualizada en la interfaz de *Rhino* (Romaniak & Filipowski, 2018) en distintos planos.

El modelado de la estructura se basa en diagramas Voronoi 3D (ver sección Aleatoriedad mediante diagramas de Voronoi) cuyas celdas se distribuyen de forma aleatoria dentro de la geometría indicada, obteniendo una estructura compleja que varía de acuerdo al número de puntos (N) o el índice aleatorio (S), según el objetivo de porcentaje de porosidad (%P).

Las etapas del proceso de diseño se presentan en la Figura 12: partiendo por definir la geometría cilíndrica (Figura 12 literal a). En Grasshopper, el cilindro es una superficie hueca, por lo tanto se cubre los agujeros con tapas (Figura 12 literal b), esta forma cerrada es poblada con un conjunto de puntos distribuidos aleatoriamente en un volumen de caja delimitadora (Figura 12 literal c), que representan el número de semillas que generan el conjunto 3D Voronoi de celdas poliédricas. A continuación, se realiza la intersección del cilindro y las celdas 3D Voronoi (Figura 12 literal e). De cada *Brep* formado por las caras de las celdas Voronoi, se halla su centroide que corresponde al punto final de la línea y el centroide de cada volumen de la celda 3D se convierte en el inicial. Dando como resultado la construcción de una red de líneas intersecadas dentro del cilindro (Figura 12 literal f). Finalmente, con el complemento *Multipipe* se crea un marco con uniones suaves a partir de las líneas intersecadas (Figura 12 literal g).

Figura 12

Diseño paramétrico de estructura porosa aleatoria mediante Grasshopper



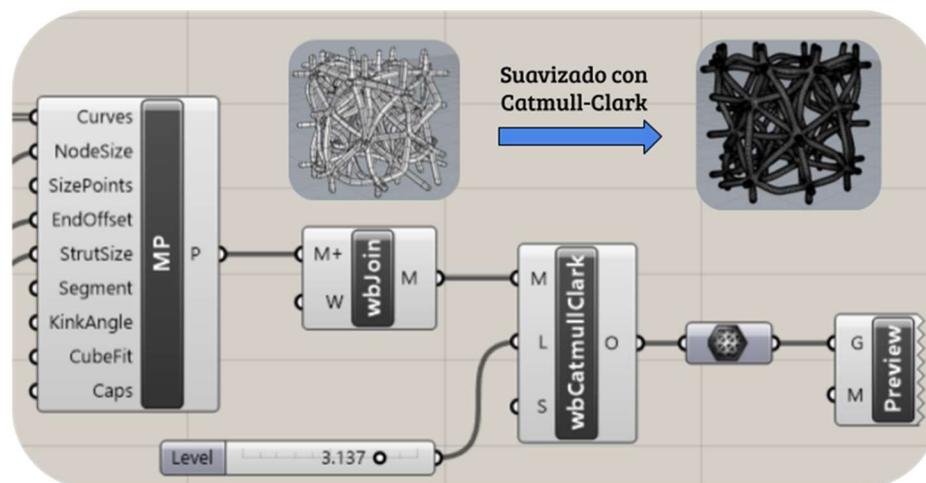
Nota. El diagrama de flujo representa el proceso del algoritmo de programación mediante bloques y su validación, previo a su exportación en formato STL.

Suavizado de malla

Para completar el proceso de suavizado del modelo de malla 3D final (Figura 12h), se aplica el algoritmo de *CatmullClark*, proporcionado por el plug-in *Grasshopper Weaverbird* (Figura 13). La subdivisión de Catmull-Clark es un método para suavizar una superficie de malla poligonal tridimensional dividiendo los polígonos de la superficie en polígonos más pequeños (Catmull & Clark, 1978). Esta subdivisión facilitará posteriormente, determinar el volumen de mallado de la estructura.

Figura 13

Suavizado de malla con algoritmo de Catmull-Clark



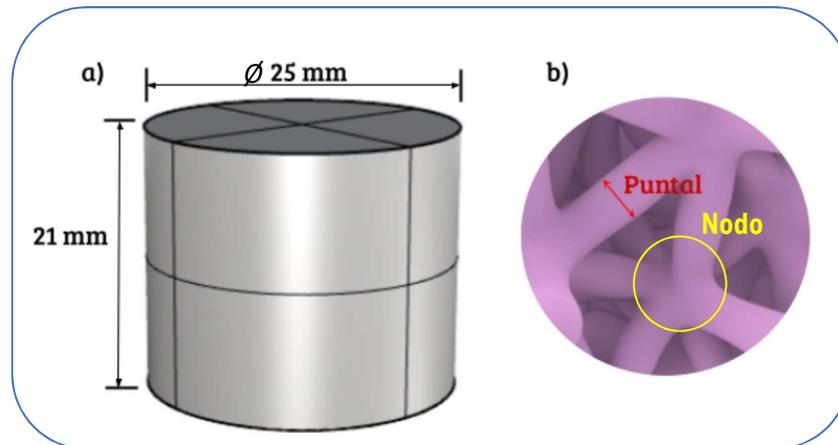
Nota. El suavizado de Catmull – Clark se implementa con dos bloques adicionales para observar su resultado en e programa.

Combinación de parámetros definidos por el usuario

Para encontrar una correlación entre los parámetros (número de puntos e índice de patrón aleatorio) y la porosidad objetivo, se mantiene constante el diámetro del puntal (*StrutSize*), tamaño del nodo y la geometría (cilíndrica).

Figura 14

Esquema gráfico de geometría y elementos principales de la estructura

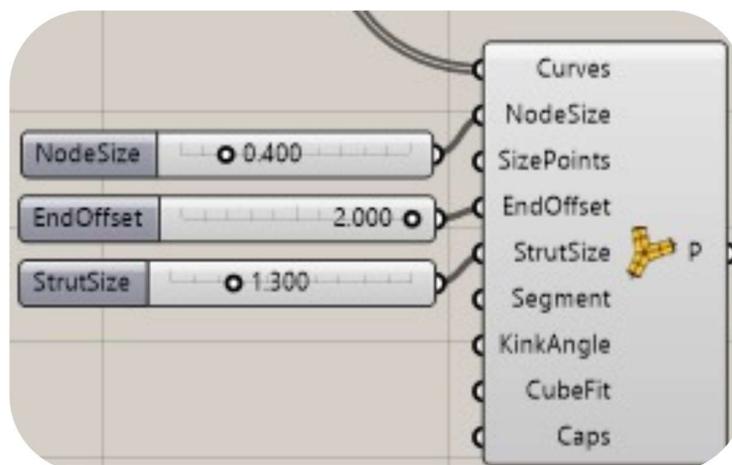


Nota. a) Medidas generales de la geometría, b) Identificación del tamaño del puntal, tamaño del nodo

Los parámetros constantes se ingresan mediante *sliders* en el plugin *Multipipe*, con valores de 0.4 en el tamaño del nodo y 1.30 para el diámetro del puntal.

Figura 15

Parámetros constantes de *Multipipe*



Nota. Las constantes se establecieron luego de evaluar la estabilidad de la estructura y su imprimibilidad.

El término imprimibilidad corresponde a la viabilidad de la impresión, es decir, se comprueba si hay zonas que queden sin soporte y pueda comprometerse la integridad estructural del modelo.

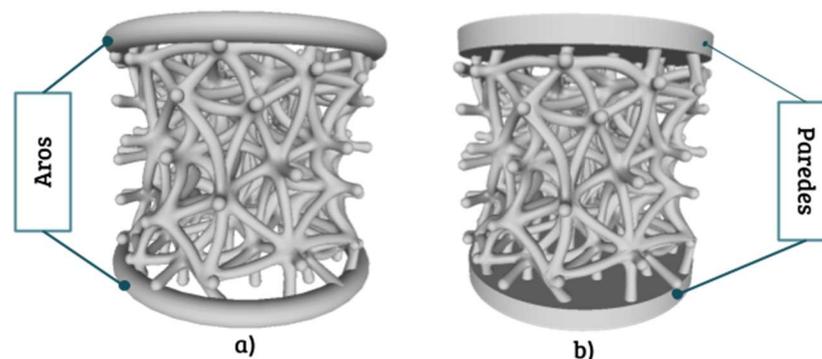
Una vez se ha obtenido el mallado 3D final, se exporta en formato STL. Este archivo se emplea para la impresión y análisis del volumen de mallado con el propósito de determinar su porosidad teórica.

Acondicionamiento de estructuras porosas aleatorias

Para la serie de experimentos planificados para caracterizar las estructuras porosas, es necesario acondicionarlas para obtener resultados fiables. Para los ensayos de permeabilidad, se añadieron aros alrededor de la estructura de 2 mm de espesor para brindarle mayor estabilidad dentro del dispositivo de experimentación. Por otro lado, para los ensayos mecánicos de las probetas, se añadieron placas circulares de 2 mm de espesor en la parte superior e inferior de cada estructura, con el objetivo de que la fuerza axial se distribuya uniformemente en toda la geometría.

Figura 16

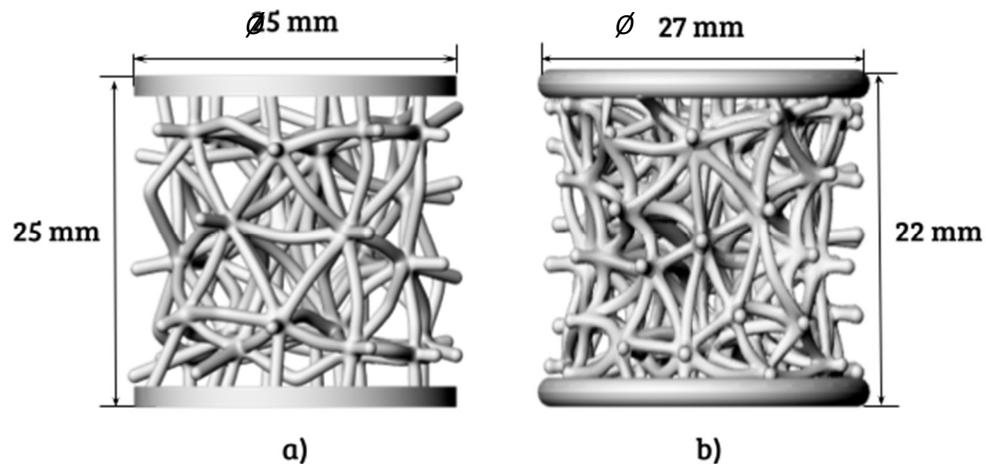
Probetas con aros para ensayo de permeabilidad a) y b) paredes para ensayos mecánicos



Nota. Las dimensiones finales del diseño CAD de cada tipo de estructura, independiente del número de puntos distribuidos en la misma.

Figura 17

Dimensiones finales del CAD de probetas porosas con a) paredes b) aros.



Nota. Las dimensiones finales del diseño CAD de cada tipo de estructura se establecen mediante los ensayos y mediciones en el software CAD.

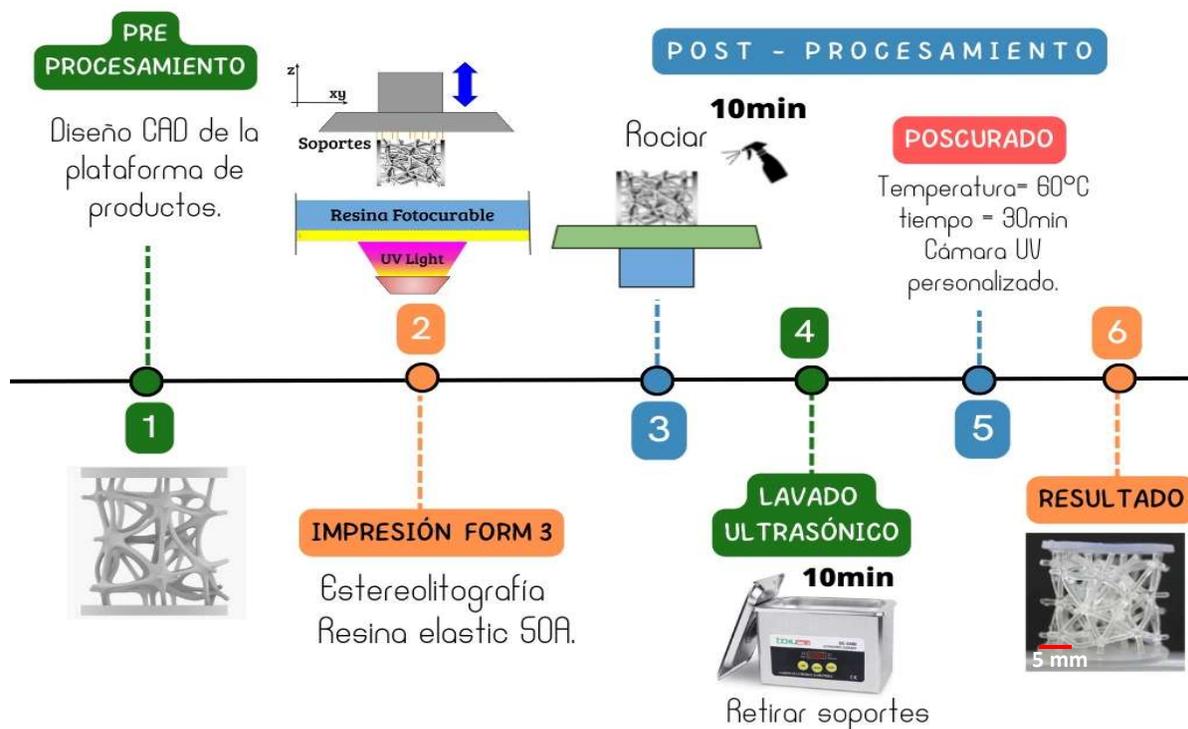
Manufactura aditiva de estructuras porosas aleatorias

Como material de fabricación se emplea la resina Elastic 50A (Formlabs, Somerville, MA). Esta resina se utiliza ampliamente en aplicaciones en las que se requiere que las piezas se doblen, estiren y compriman bajo cargas cíclicas sin desgarrarse (Formlabs, 2019). Para consultar las propiedades de la resina Elastic 50 A, revisar ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Las estructuras porosas aleatorias se fabricaron de forma aditiva utilizando una impresora Form 3 (Formlabs, Somerville, MA). La impresión se configuró con un grosor de capa de 100 μm (Figura 18 literal 2). Tras la impresión, las estructuras se limpiaron cuidadosamente con alcohol isopropílico al 90% durante 10 minutos sobre la plataforma de impresión (Figura 18 literal 3). Posteriormente, se retiraron los soportes y se pasó al tanque de limpieza ultrasónico (Ultrasonic Cleaner BK-2400, s/f) durante 10 min (Figura 18 literal 4). Por último, las estructuras porosas se post-curaron durante 30 minutos a 60 °C en una cámara UV personalizada (Figura 18 literal 5).

Figura 18

Diagrama de procesos de preprocesamiento, impresión y post-procesamiento de estructuras porosas mediante SLA



Nota. En general, el proceso de manufactura aditiva empieza con el pre procesamiento, impresión y finaliza con el post procesamiento.

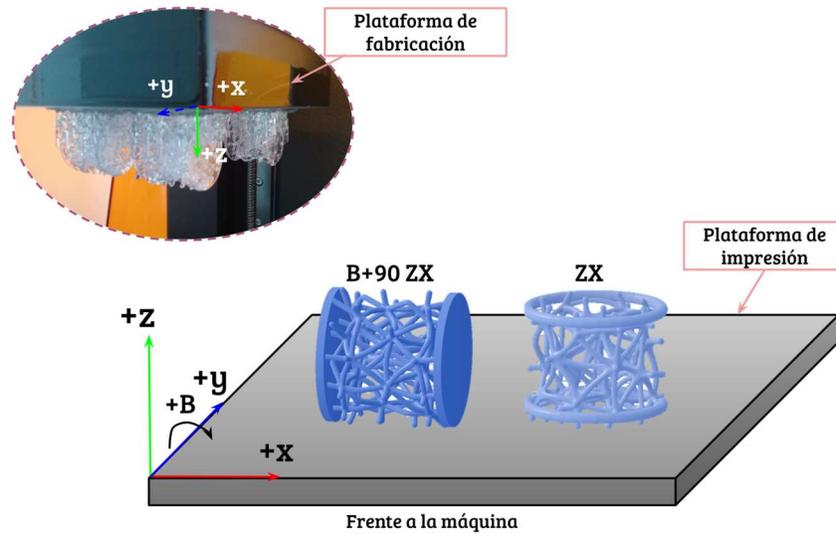
Orientación de las probetas y ubicación de soportes en estructuras porosas

Orientación

La orientación de la pieza juega un papel importante para obtener el producto final sin defectos. Para el caso de las estructuras con paredes se orienta B90 ZX (Figura 19), con el propósito que la resina no llegue a acumularse en el interior de la estructura durante la impresión. Para las estructuras con aros se orienta en forma vertical en el plano ZX.

Figura 19

Orientación de probetas en la plataforma de impresión Preform



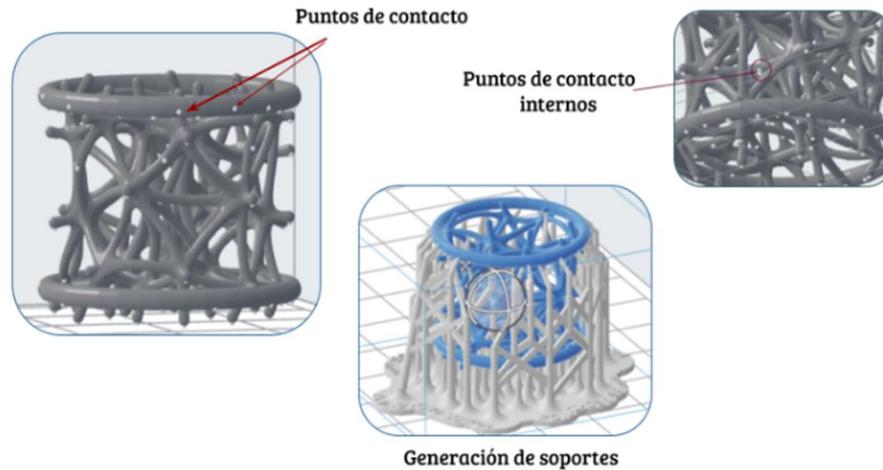
Nota. Se muestra la nomenclatura para orientación de los modelos en la plataforma de impresión. Tomado de *Standard terminology for additive manufacturing*, por ASTM 52921, 2013, ISO.

Soportes para impresión de probetas porosas

La resina Elástica 50A es un material que requiere más soportes que otras resinas para evitar deformaciones por la fuerza del ciclo de separación de capa (Formlabs, 2019). Para las estructuras porosas aleatorias se generaron soportes automáticamente con una densidad de 0.90, tamaño de punto de contacto de 0.40 para soportes internos y de 0.50 para soportes externos. Se retiraron manualmente la mayor cantidad de puntos de contacto de la parte interior de la estructura, sin perder el factor de imprimibilidad del software PreForm.

Figura 20

Generación de soportes internos y externos en las estructuras



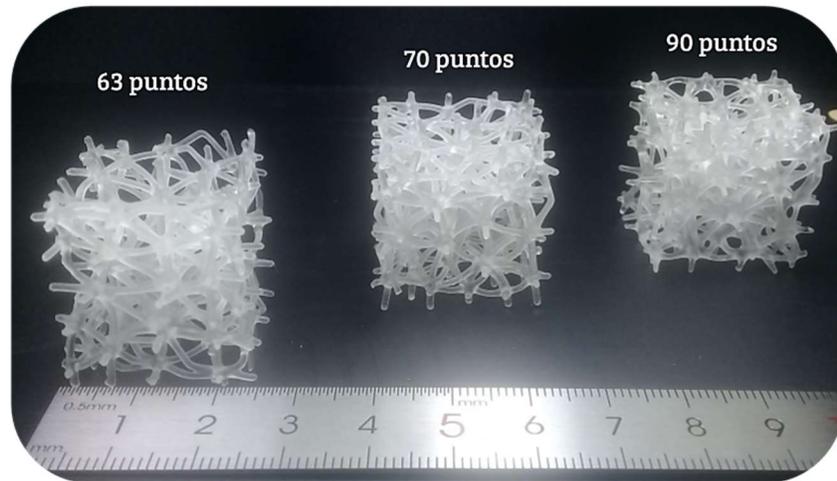
Nota. La ubicación de los soportes puede variar de acuerdo al tipo de estructura porosa y la cantidad de puntos con la que es configurada.

Probetas finales impresas con porosidad variada

Dependiendo de la cantidad de soportes y tipo de probeta (sin aros, con aros y paredes), varía el tiempo de impresión. En promedio, para las estructuras se obtuvo un tiempo de impresión de 7 horas para 5 probetas sobre la plataforma de impresión. Señalar el tiempo y cantidad de probetas, resulta relevante puesto que la técnica de Estereolitografía tarda más que otras como la DLP (Digital Light Processing), por depender únicamente de un láser UV y su tamaño de punto para polimerizar la sección transversal de las probetas (Gibson et al., 2021). Para el caso del modelo Form 3 de SLA, el láser tiene un tamaño de 85 μ m.

Figura 21

Probetas cúbicas para pruebas de imprimibilidad, lado 25 mm.



Nota. Se realizaron pruebas de imprimibilidad para contemplar problemas y posibles soluciones de impresión.

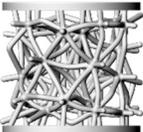
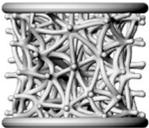
Caracterización de estructuras porosas aleatorias

Estudio dimensional

Previo a realizar cualquier ensayo es importante comparar las dimensiones de las probetas finales y el diseño CAD (

Figura 17) (Luo et al., 2019). Las dimensiones individuales de las estructuras porosas se midieron utilizando un calibrador (*Digital Caliper*) con 0,01 mm de resolución. Considerando las condiciones geométricas estudiadas en la plataforma de diseño y la cantidad limitada de material de impresión (además de su costo), se optó por imprimir 3 probetas con las siguientes características:

Tabla 2*Probetas impresas para estudio mediante Estereolitografía*

Probeta	Imagen	Características
Sólido		Dimensiones: Ø 25 mm, altura 21 mm
Con paredes 30(S1), 65 (S2) y 100 (S3) puntos		Dimensiones: Ø 25 mm, altura 25 mm Empleadas para ensayos mecánicos
Con aros 30, 65 y 100 puntos		Dimensiones: Ø 27 mm, altura 22 mm Empleadas para ensayos de permeabilidad

Nota. La nomenclatura S1, S2 y S3 corresponde a los valores 30, 65 y 100 puntos, respectivamente.

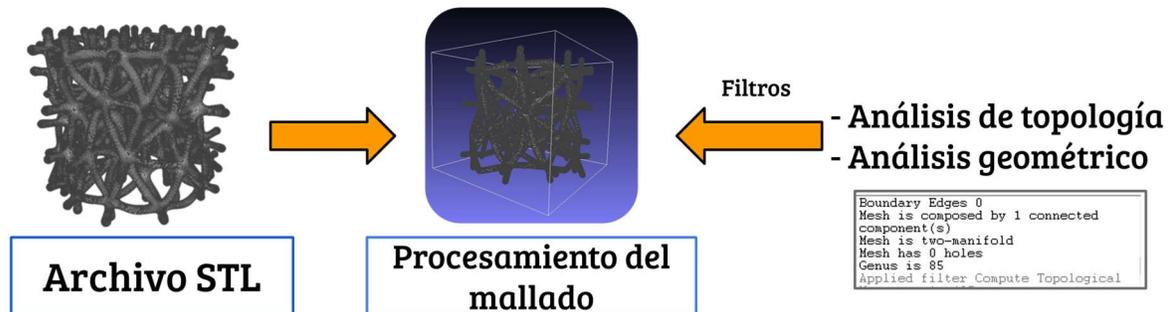
Método de cálculo de porosidad teórica

Como se menciona en el Capítulo II, las estructuras porosas son de especial interés en la ingeniería de tejido, en particular en tejidos óseos. Por tanto, el diseño de porosidad es importante para evaluar propiedades mecánicas y sus posibles efectos de la remodelación ósea (Renders et al., 2007).

Dada la complejidad de la estructura generada, resulta complicado determinar el tamaño exacto del poro, especialmente para estructuras pobladas con demasiados puntos (Horgan, 1999). Para este caso, el análisis se basa en obtener el volumen de mallado (Figura 13) de la estructura, éste corresponde al espacio poroso. El recurso empleado para determinar este volumen es el software MeshLab (Cignoni et al., 2008) que permite procesar y editar mallas 3D.

Figura 22

Filtros aplicados en MeshLab para analizar la estructura porosa



Nota. Procesamiento del modelo CAD para evaluación de su mallado y porosidad teórica.

El primer resultado de análisis de topología, indica si el archivo del diseño STL de la estructura corresponde a una malla cerrada sin agujeros. Una vez se confirma el mallado cerrado, se analiza la geometría de la estructura cuyo dato de interés corresponde al volumen del mallado. A partir de este dato, se procede a determinar el porcentaje de porosidad (%P) con la siguiente formulación matemática:

Ecuación 4

$$\%P = \left(1 - \frac{V_m}{V_C}\right) * 100\%$$

Donde:

V_m = Volumen del mallado

V_C = Volumen del cilindro

Ecuación 5

$$V_C = \pi * r^2 * h$$

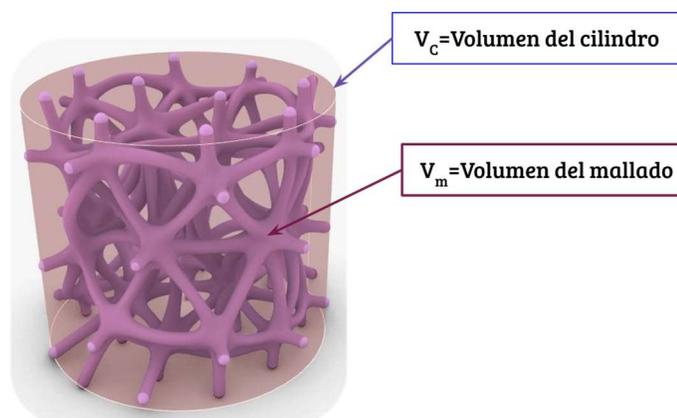
Donde:

r = radio del cilindro

h = altura del cilindro

Figura 23

Representación gráfica del volumen del cilindro y mallado de la estructura



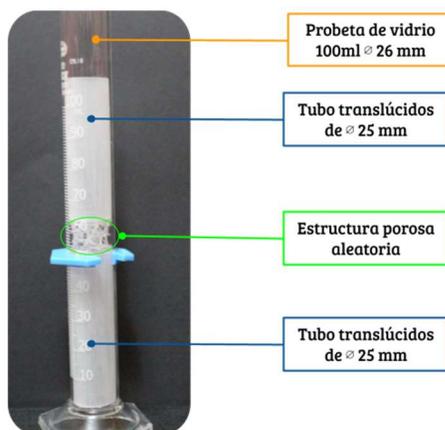
Nota. Los volúmenes corresponden a la probeta sin aros ni paredes (Figura 12 literal h) y sus unidades en mm^3 .

Ensayo de permeabilidad en probetas porosas aleatorias

La permeabilidad es una característica que es necesario predecir y evaluar en estructuras porosas, dado que se puede evaluar la capacidad de transporte del fluido con diferentes porcentajes de porosidad. La permeabilidad de las estructuras porosas fue medida usando un dispositivo experimental acondicionado para este propósito (Figura 24). El mecanismo de medición se construyó a partir de una probeta de vidrio de 100 ml, en cuyo interior se encuentra un tubo de 25 mm de diámetro, que sirve para soporte de la estructura porosa y evitar que se deslice. Se eligió jabón líquido (*Jolly*, densidad aproximada 1200 kg/cm^3) como fluido para evaluar la permeabilidad de las muestras. Adicionalmente, se colocó un tubo en la parte superior para guiar el líquido y evitar el desborde por los lados de la estructura. Se midió el tiempo que tarda la columna de líquido en atravesar la estructura porosa. Se efectuaron 4 mediciones por cada probeta.

Figura 24

Acondicionamiento del experimento de permeabilidad para la estructura porosa

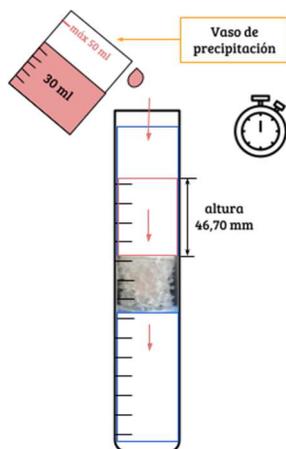


Nota. El experimento empírico de permeabilidad consta de probetas de diámetros ajustados a la estructura porosa.

El proceso experimental consiste en verter el jabón líquido a través de la estructura porosa y cronometrar el tiempo que tarda en pasar el líquido a través de la misma. El volumen de líquido inicial se mide mediante un vaso de precipitación con un valor de 30 ml.

Figura 25

Esquema de realización del experimento de permeabilidad



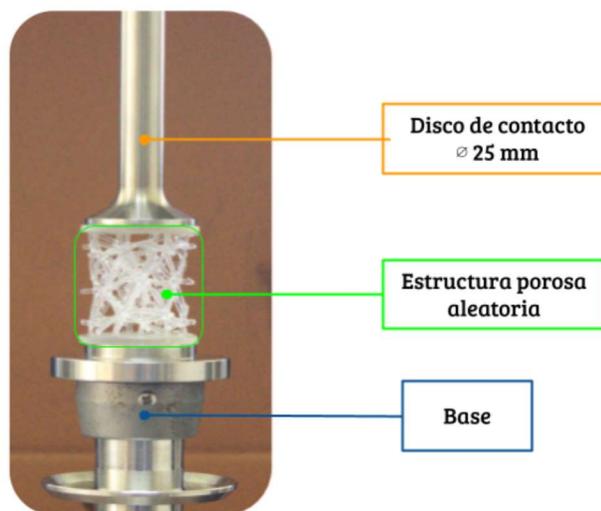
Nota. Cronometrado y medición de líquidos empleados para el ensayo.

Prueba mecánica en estructuras porosas aleatorias

Se realizaron pruebas de compresión uniaxial para identificar las propiedades mecánicas de las estructuras porosas flexibles con diferente porcentaje de porosidad. Los ensayos mecánicos se realizaron en un reómetro (DHR 2 TA Instruments) con una celda de carga de 50 N, una velocidad de ensayo de 550 $\mu\text{m/s}$ y un disco de contacto de 25 mm. Todas las respuestas de compresión de las estructuras porosas durante la carga fueron registradas por una cámara digital (EOS 1100d, Canon). Se utilizaron dos muestras por cada tipo de estructura porosa aleatoria para este ensayo.

Figura 26

Ensayo de compresión uniaxial en estructura porosa aleatoria



Nota. Componentes de máquina de ensayos y ubicación de probeta para análisis.

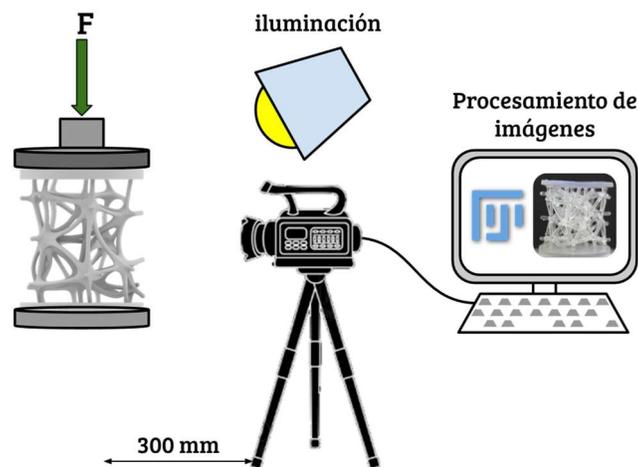
Análisis de deformación de estructuras porosas aleatorias

Para el análisis de la deformación se emplea un método denominado correlación de imágenes digitales. Este método consiste en la adquisición continua de imágenes de la superficie del material tensionado mediante una cámara y su posterior análisis mediante un software para la medición de desplazamientos (Cortez Tornello et al., 2012).

En este estudio, se emplea una cámara digital (EOS 1100d, Canon) y como software de procesamiento de imágenes y medición, Fiji (Wayne Rasband, NIH, USA). A continuación, se presenta el esquema de la metodología para adquisición de imágenes del ensayo mecánico:

Figura 27

Esquema de adquisición de imágenes para su posterior procesamiento.



Nota. Fiji es un paquete de procesamiento de imágenes ampliamente utilizado en microscopía de fluorescencia.

Procedimiento de medición

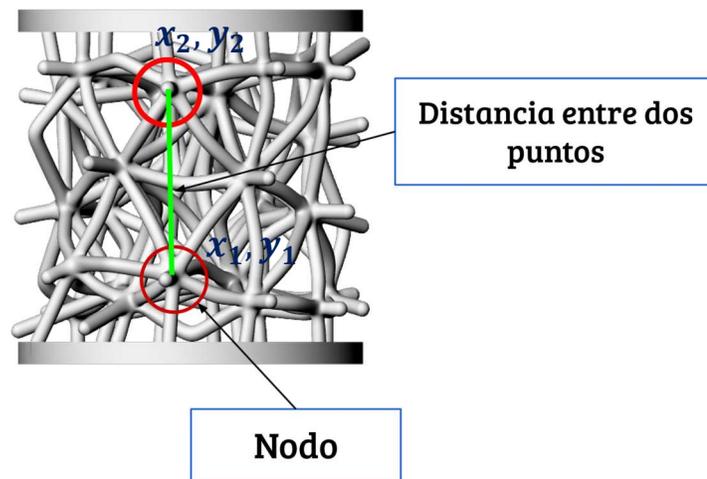
Para el estudio se procesan 7 imágenes de cada probeta (S1, S2 S3).

- Inicialmente, se mide una distancia conocida dentro de la imagen con el comando línea. En este caso, la medida conocida corresponde al diámetro del disco de contacto con un valor de 25mm.
- Seteado el valor de 25 mm con su equivalente en píxeles. Se realizan 5 mediciones de la misma distancia cuya media corresponde al factor de escala.

- Determinado el factor de escala, se realizan varias mediciones de distancias tomando como referencia un nodo visible de la estructura con respecto a otro (Figura 28). El programa mostrará las coordenadas x e y de cada punto analizado.

Figura 28

Esquema de medición de distancia de dos puntos



Nota. Componentes x e y para determinar la distancia entre puntos y deformación de la probeta.

- Con las coordenadas de cada nodo, se calcula la distancia empleando la ecuación de distancia entre dos puntos:

Ecuación 6

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

- Se realiza las mismas mediciones para cada valor que se registra hasta construir las curvas de deformación de cada estructura porosa con la siguiente formulación matemática:

Ecuación 7

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} * 100\%$$

l_f = longitud final (mm)

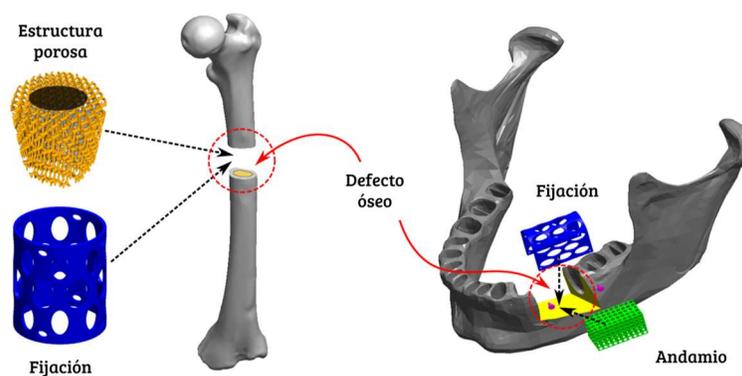
l_0 = longitud inicial (mm)

Validación con prueba conceptual

Una de las aplicaciones emergentes donde se utiliza estructuras porosas es la ingeniería de tejidos. El autor (Lee et al., 2022) define el término andamio (*scaffold*) como una estructura porosa que emula las características de tejidos tipo óseo o muscular. Debido a la complejidad de los andamios estos pueden ser fabricados empleando manufactura aditiva (Gómez et al., 2016). Cuando el defecto es grande (Figura 29), el hueso no se repara y requiere de un relleno para regenerarse. Este relleno puede ser un andamio poroso con propiedades mecánicas y estructurales adaptativas (Yilgor et al., 2008).

Figura 29

Aplicaciones de estructuras porosas (Scaffolds) en ingeniería de tejido óseo.



Nota. Zona ósea afectada por un andamio poroso que facilite la regeneración celular del tejido en el paciente. Tomado de *Fabrication of porous scaffolds using additive manufacturing with potential applications in bone tissue engineering*, por Lara-Padilla, 2018.

La prueba conceptual consiste en someter las probetas porosas flexibles, previamente caracterizadas, a un análisis mecánico dinámico (DMA) para simular las condiciones de un entorno fisiológico del tejido específico a reparar y complementar con la caracterización viscoelástica de las estructuras porosas fabricadas. Los lineamientos del ensayo se basan en condiciones similares a las desarrolladas en (Moroni et al., 2006) y (Yilgor et al., 2008). En esta publicación comparan las propiedades viscoelásticas del andamio diseñado con las de un cartílago articular bovino.

Para las estructuras porosas flexibles, se efectúa un barrido de frecuencia de 0.1 a 16 Hz con una precarga de 5 N. La máquina empleada para este propósito es un Reómetro (DH 2-TA Instruments) con un disco de contacto de 25 mm.

Capítulo IV

Resultados y Discusión

Estudio Dimensional

Las variables comparadas entre el diseño CAD y las probetas impresas son la altura y el diámetro en mm para las 3 probetas con aros y paredes.

Figura 30

Probetas cilíndricas con aros de \varnothing 25 mm con 3 tipos de cantidad de puntos

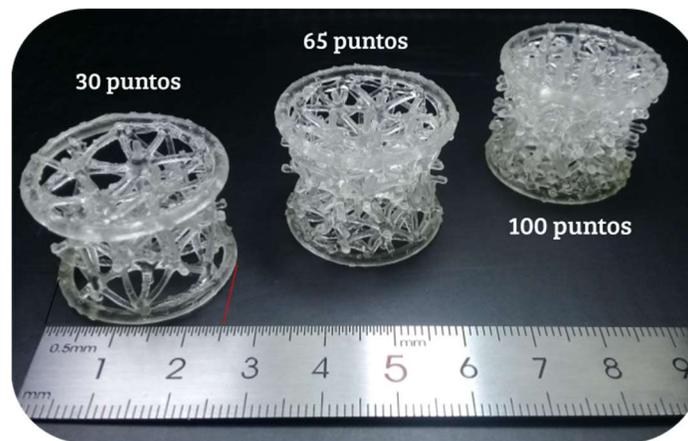


Figura 31

Probetas cilíndricas con paredes de 2 mm de espesor y \varnothing 25mm

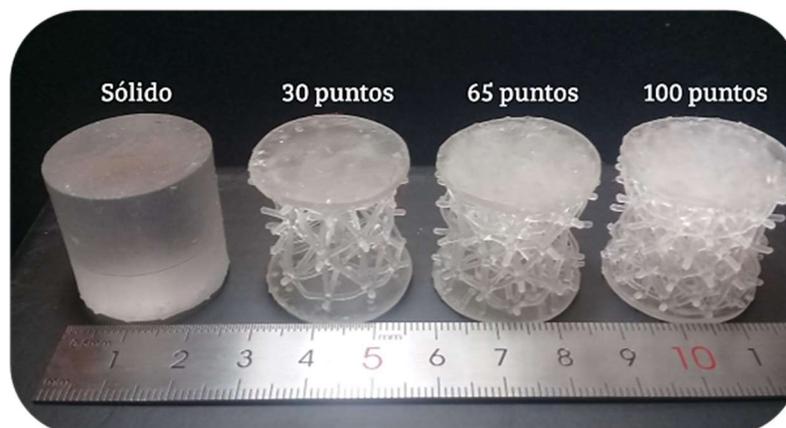
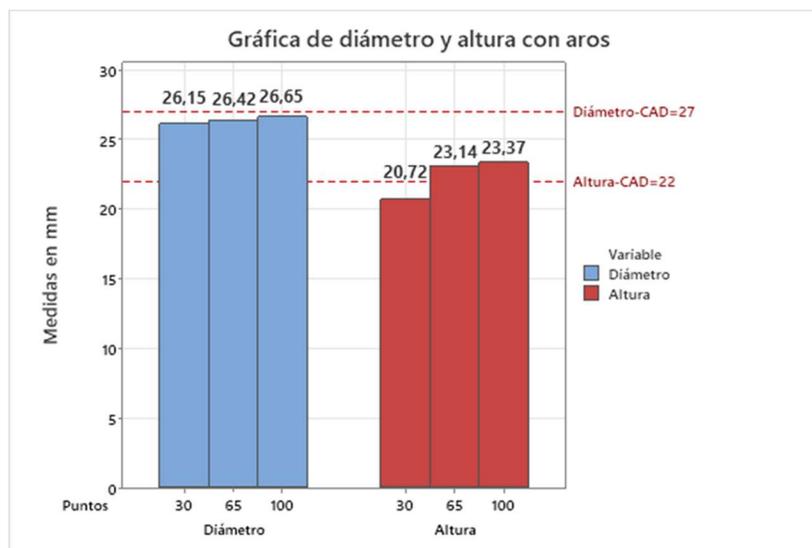


Figura 32

Gráfica de mediciones de diámetro y altura de 3 tipos de probetas con aros



Como se puede observar los valores de la impresión difieren del diseño CAD en ± 0.37 mm para el caso del diámetro y para la altura varía en ± 1.46 mm. Principalmente, la causa es la cantidad de puntos que contienen, las uniones de nodos le brindan más o menos estabilidad a la hora de imprimir. Cabe señalar que los 3 tipos de estructuras se imprimieron en la misma orientación.

Tabla 3

Mediciones de probetas impresas vs diseño CAD con paredes.

Tipología de la estructura	Diseño CAD		Impresión			
	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)
30 puntos (paredes)	25	25	25,62	26,00	25,22	25,70
65 puntos (paredes)	25	25	26,85	25,26	25,71	24,57
100 puntos (paredes)	25	25	26,55	26,02	26,02	25,82

A continuación, se muestra la gráfica de intervalos y análisis de varianza de las dimensiones de altura y diámetro de las probetas con paredes, se tomaron 2 mediciones por cada parámetro.

Figura 33

Gráfica de intervalos para el diámetro de las probetas.

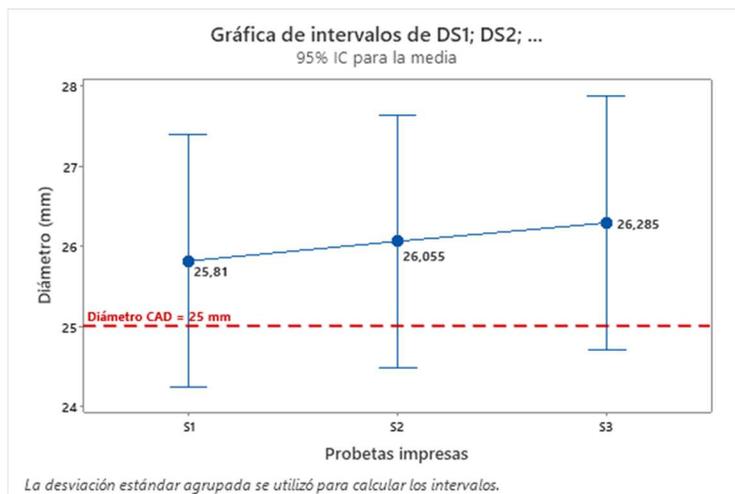


Tabla 4

Análisis de Varianza diámetro de probetas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0,2257	0,1128	0,23	0,808
Error	3	1,4767	0,4922		
Total	5	1,7024			

Como se puede observar, el valor $p > \alpha$ (0.05) se acepta H_0 (Hipótesis nula), todas las medias son iguales, es decir no hay una diferencia significativa entre las medias de los diámetros de las dos muestras de cada probeta.

Figura 34

Gráfica de intervalos de altura de las muestras de cada probeta

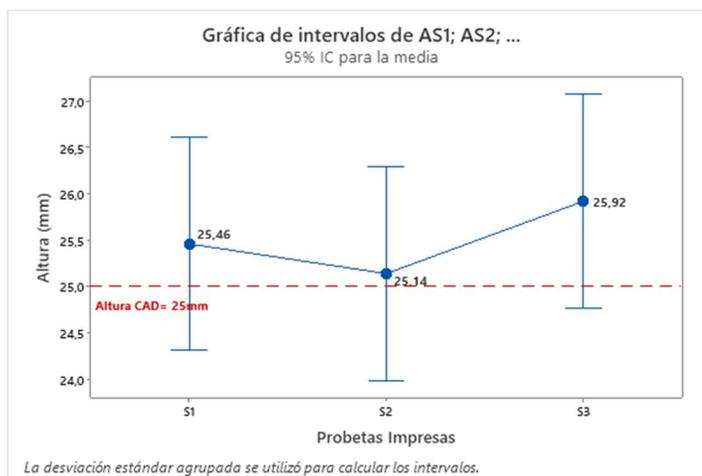


Tabla 5

Análisis de Varianza altura de probetas

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0,6149	0,3075	1,18	0,420
Error	3	0,7850	0,2617		
Total	5	1,3999			

Como se puede observar, el valor $p > \alpha$ (0.05) se acepta H_0 (Hipótesis nula), todas las medias son iguales, es decir no hay una diferencia significativa entre las medias de las alturas de las dos muestras de cada probeta.

Porosidad teórica

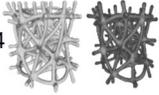
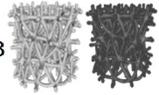
Luego de algunas pruebas de imprimibilidad de las estructuras porosas y evaluar la mejor combinación de parámetros de tamaño de puntal y nodo (Figura 15), se establecieron 3 clases de estructuras con diferente cantidad de puntos aleatorios (N) con 30, 65 y 100 puntos

Tabla 2.

De acuerdo a las expresiones matemáticas del apartado *Método de cálculo de porosidad teórica*, se obtienen los siguientes volúmenes y porcentajes de porosidad:

Tabla 6

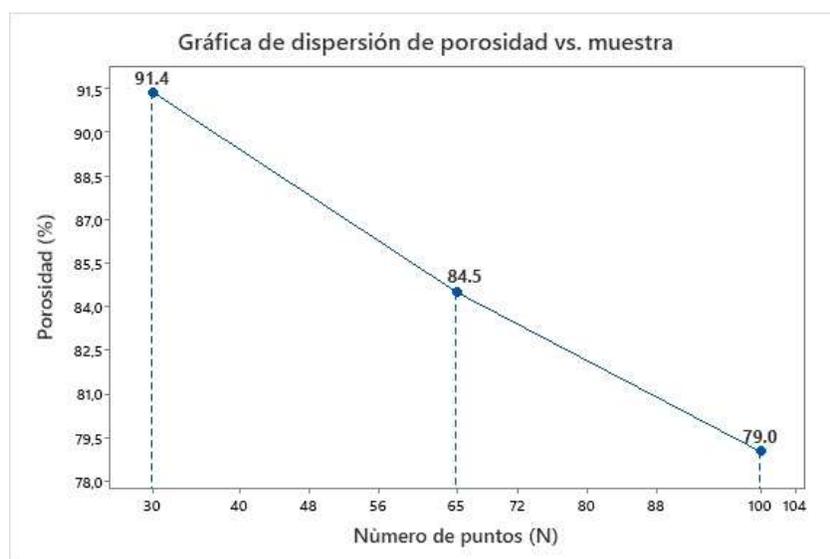
Resultados obtenidos de porosidad teórica y reporte de MeshLab.

Cod	Puntos (N)	Índice Aleatorio (S)	Strut Size	Node Size	Volumen Mallado (mm ³)	Volumen Cilindro (mm ³)	Fracción Volumétrica	% Porosidad	Reporte de MeshLab	Estructura final (sólido-mallado)
S1	30	5	1.3	0.4	885.416	10308.35 1	0.086	91.4%	Caras: 363 584 Vértices: 181 624 Agujeros:0	
S2	65	5	1.3	0.4	1601.87 3	10308.35 1	0.155	84.5%	Caras:721 024 Vértices: 360 078 Agujeros:0	
S3	100	5	1.3	0.4	2160.17 5	10308.35 1	0.210	79.0%	Caras:1 050 496 Vértices:524 528 Agujeros:0	

Nota. La característica *agujeros* indica si la superficie mallada está completa o incompleta. Siendo 0 un indicador de un mallado óptimo.

Figura 35

Gráfica de dispersión de % Porosidad vs Número de puntos (N)

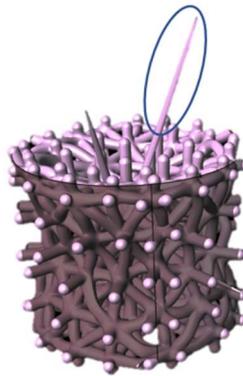


De acuerdo a la Figura 35, se observa que existe una relación lineal entre el número de puntos y el porcentaje de porosidad. Al aumentar la cantidad de puntos el volumen de mallado aumenta y visualmente, en las estructuras los espacios se reducen; dando como resultado un porcentaje de porosidad menor.

Si bien es cierto la plataforma de productos permite ingresar un número mayor a 100 y menor a 30 puntos, al igual que variar el tamaño del nodo y puntal (Figura 14 literal b). Se observa que la estructura porosa, no tiene un diseño adecuado con valores superiores a 100 puntos con la configuración de los datos previamente señalados como constantes en el complemento *Multipipe*. El resultado de estas variaciones ocasiona picos sobresalientes de la geometría cilíndrica (Figura 36).

Figura 36

Inestabilidad de la estructura porosa aleatoria



Nota. El término inestabilidad se refiere a distorsiones en la estructura por inconsistencias en las relaciones de tamaño del nodo, puntal y demasiados puntos ingresados en la plataforma de productos.

Ensayo de Permeabilidad

De acuerdo a la experimentación, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7

Mediciones de tiempo que tarda en pasar el líquido a través del tipo de estructura porosa

	S1	S2	S3
	30 puntos	65 puntos	100 puntos
Tiempo 1 (min)	4.09	12.39	25.19
Tiempo 2 (min)	4.13	13.20	26.01
Tiempo 3 (min)	3.46	12.47	26.04
Tiempo 4 (min)	4.34	13.20	25.47
Volumen final	25 ml	25 ml	20 ml

Como se puede observar en la Tabla 7, en la estructura porosa aleatoria S1 con 30 puntos (91.4 %) el fluido circula a través de la misma 3 veces más rápido que la estructura porosa S2 (84.5 %). Por otro lado, en la estructura porosa aleatoria S3 (79.0 %) tarda en promedio 25.67 minutos en descender el líquido a través de ella, observando una mayor retención del fluido en la parte interna de la estructura, es decir es menos permeable que las estructuras S1 y S2 (Figura 38).

Figura 37

Gráfica de intervalos de tiempo vs porosidad



Si bien es cierto es un método experimental para evaluar la permeabilidad, éste brinda una visión general de la relación directa que existe entre el porcentaje de porosidad y la permeabilidad de la estructura (Figura 37).

Figura 38

Retención del fluido en el interior de la estructura porosa S3



Análisis de áreas de las estructuras porosas

Empleando el software MeshLab (Cignoni et al., 2008), se realizaron 10 cortes en cada eje de las estructuras porosas aleatorias Figura 39, Figura 40, Figura 41 para determinar el área en cada sección. El término capa hace referencia a cada rebanado que se hace a la estructura porosa.

Figura 39

Seccionamiento de probeta de 30 puntos en el eje x, y y z.

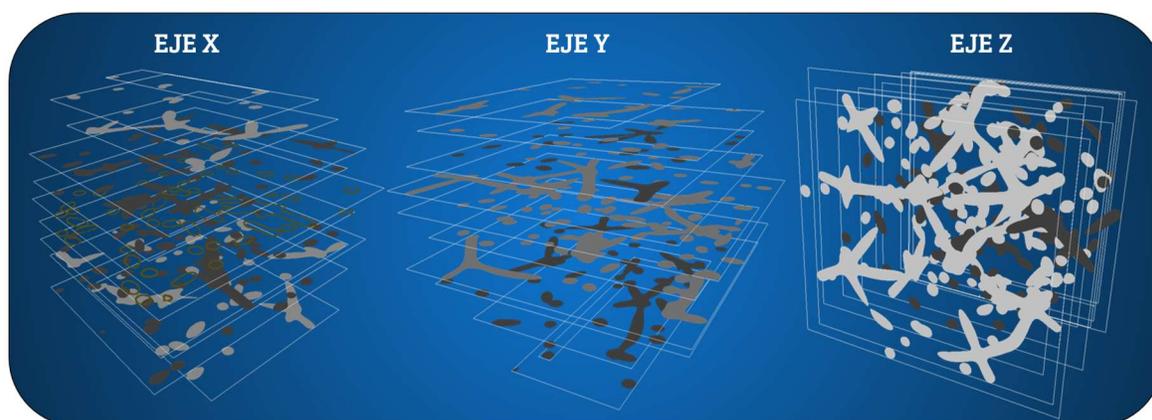
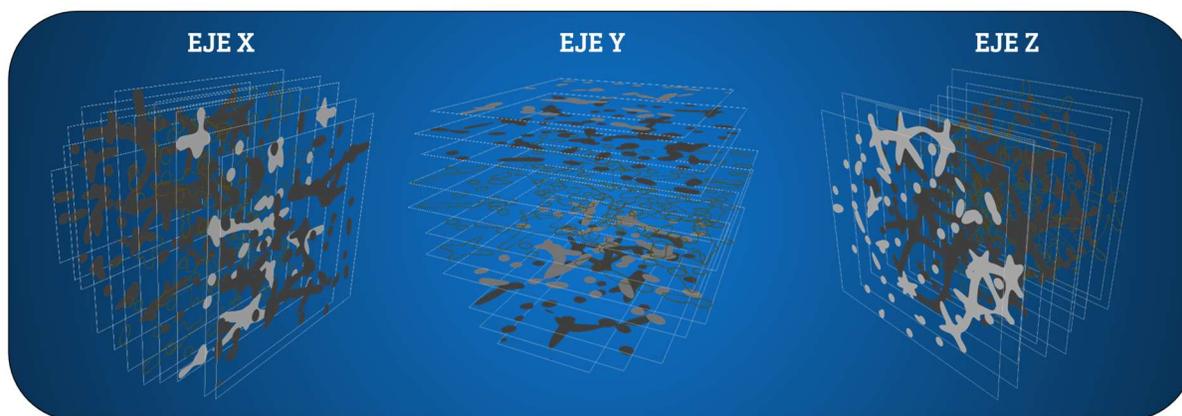


Figura 40

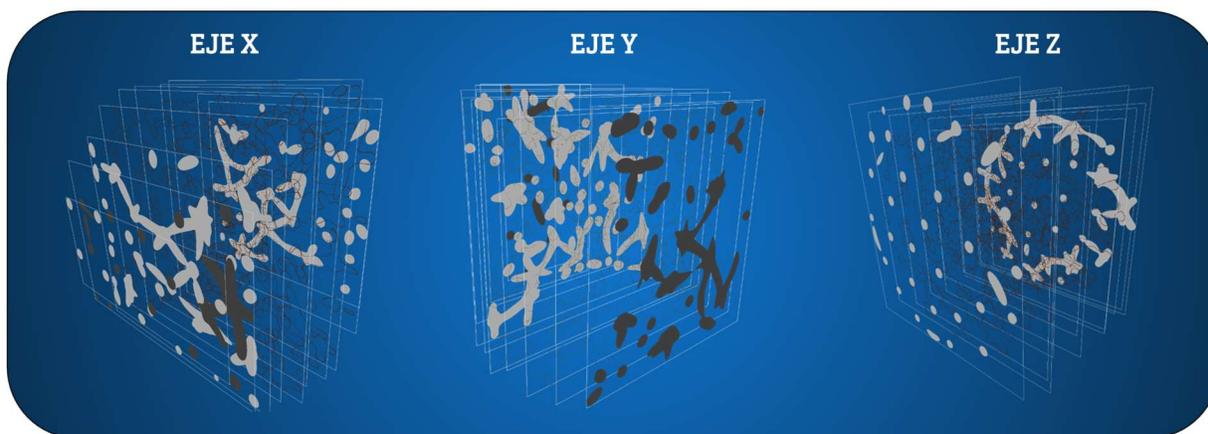
Seccionamiento de probeta de 65 puntos en el eje x, y y z.



Nota. El seccionamiento de la estructura se realiza en los siguientes intervalos: 0.05 ,0.1 - 0.9, 0.99 en dirección de cada eje. Las capas con puntos son secciones que no cuentan con un área definida

Figura 41

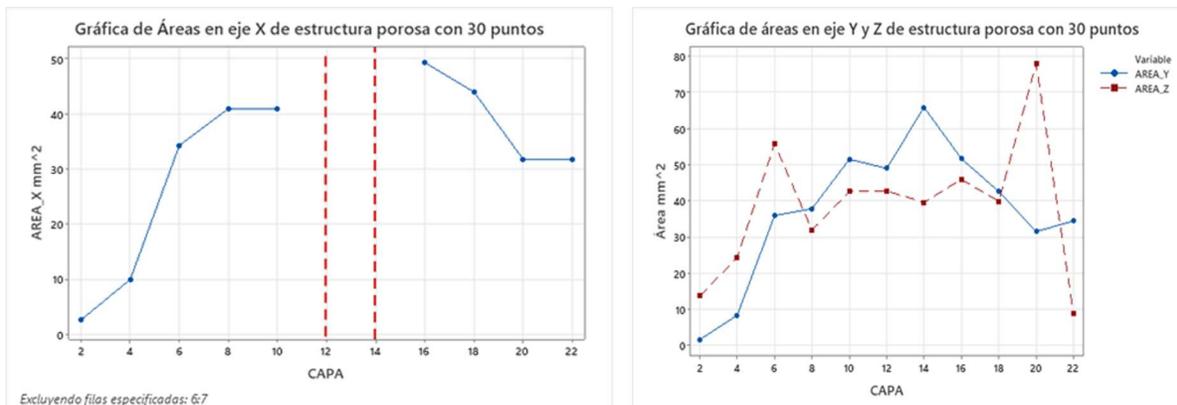
Seccionamiento de probeta de 100 puntos en el eje x, y y z.



Como se puede observar en las gráficas de tiempo, la estructura con 100 puntos contiene varias capas sin área (Figura 44) frente a otras como la estructura de 30 puntos, que presenta sólo en la capa 12 y 14 del eje X zonas sin detectar área (líneas punteadas rojas) (Figura 42).

Figura 42

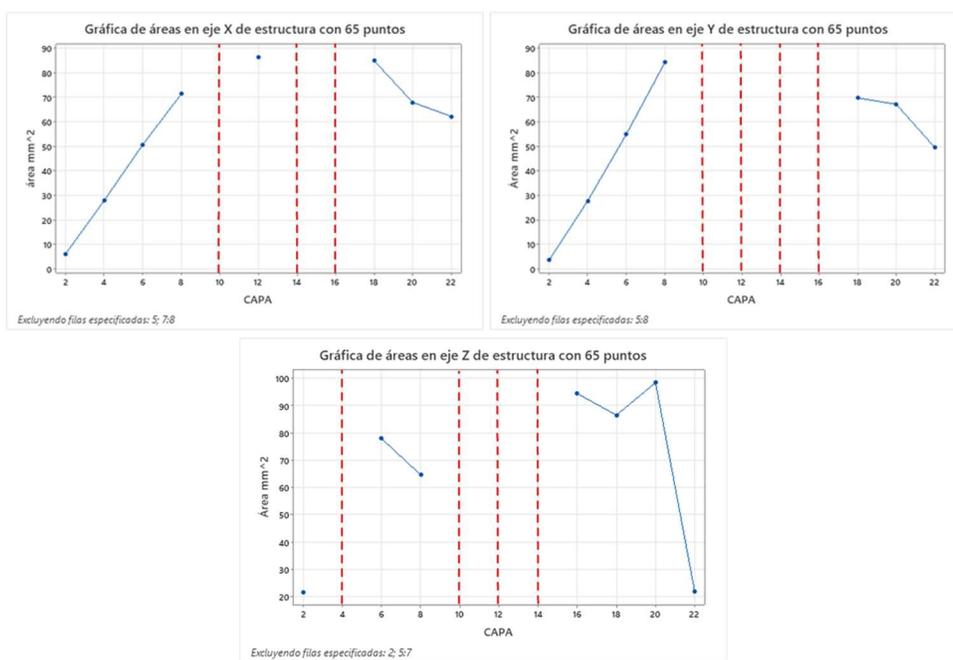
Gráficas de áreas de estructura aleatoria flexible de 30 puntos



Aquellas capas que no tienen un área para determinar, se presentan con puntos en el programa. Como se puede observar en la Figura 41 y Figura 44, la mayoría de capas presentan varios puntos que no permiten su cálculo de área.

Figura 43

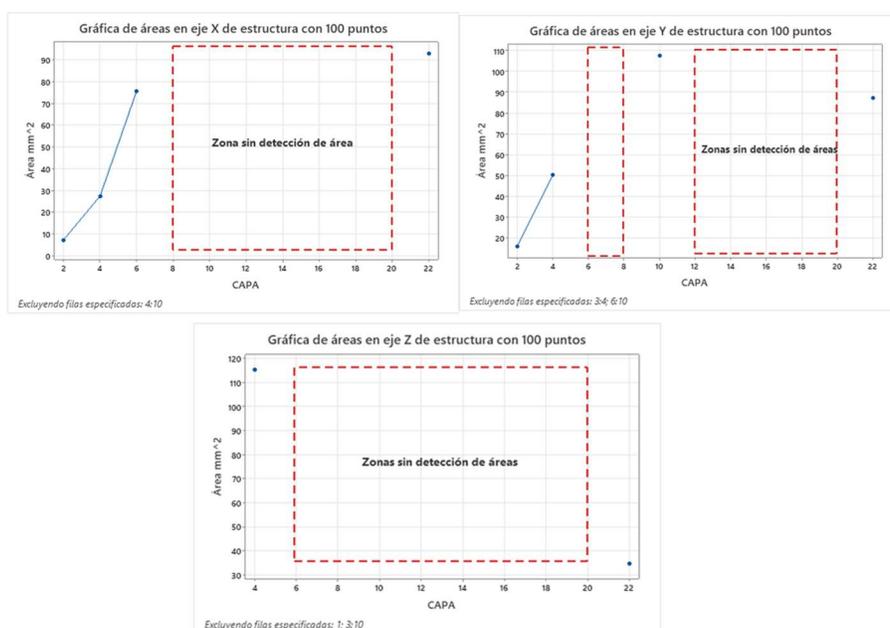
Gráficas de áreas de estructura de 65 puntos.



Para el caso de la estructura de 65 puntos, presenta esos espacios en todos sus ejes. Las capas repetitivas que cada eje son 10 y 14.

Figura 44

Gráfica de áreas de estructura de 100 puntos



Ensayo de compresión

De acuerdo a los ensayos realizados en las estructuras porosas (Figura 30, Figura 31), se obtiene las siguientes curvas de fuerza -deformación y esfuerzo – deformación (Figura 46).

Para cada configuración se probaron dos muestras para confirmar la repetibilidad de las mediciones.

Una vez finalizado el ensayo de cada probeta, se realizó una inspección visual de las estructuras con el fin de evaluar roturas o separaciones en el nodo, producto del ensayo de compresión. De forma general, las estructuras no sufrieron de ningunos de los efectos antes señalados.

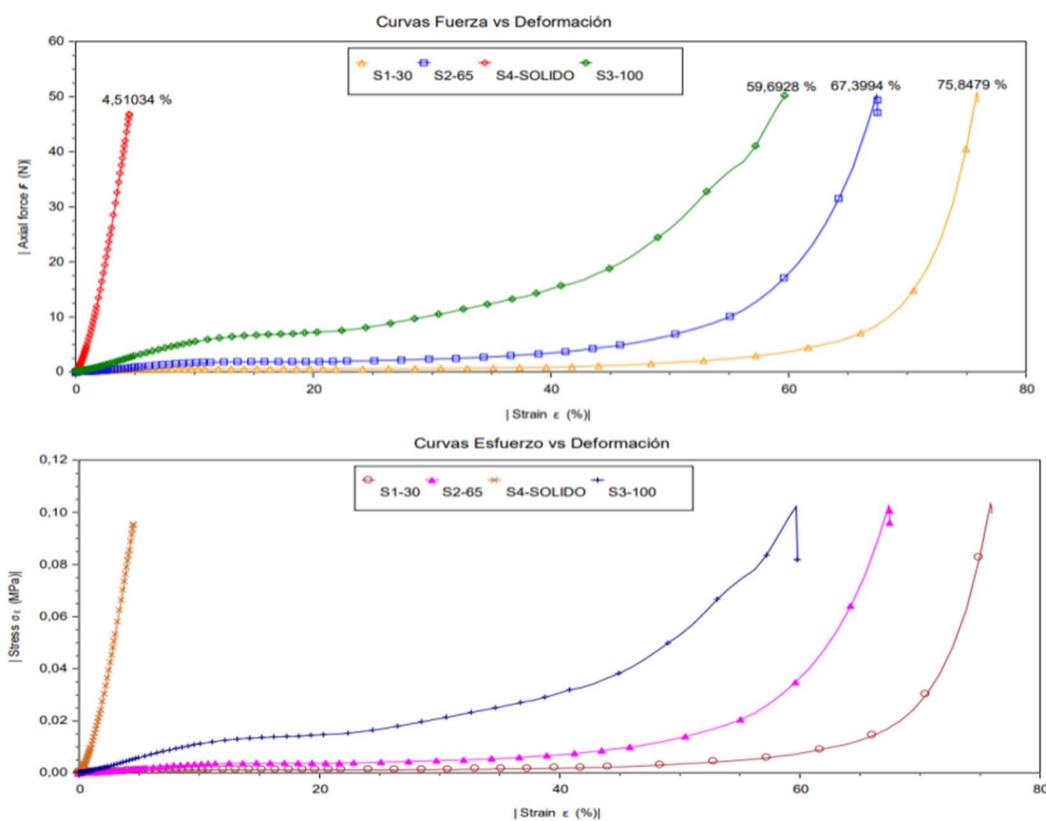
Figura 45

Configuración del ensayo en interfaz TRIOS

Environmental Control			
Temperature	20	°C	<input type="checkbox"/> Inherit Set Point
Soak Time	0.0	s	<input type="checkbox"/> Wait For Temperature
Test Parameters			
Duration	20.0	s	
Motor direction	<input type="radio"/> Tension <input checked="" type="radio"/> Compression		
Constant axial force	50.0	N	
Sensitivity	0.1	N	

Figura 46

Curvas de comportamiento mecánico de las probetas porosas y sólida



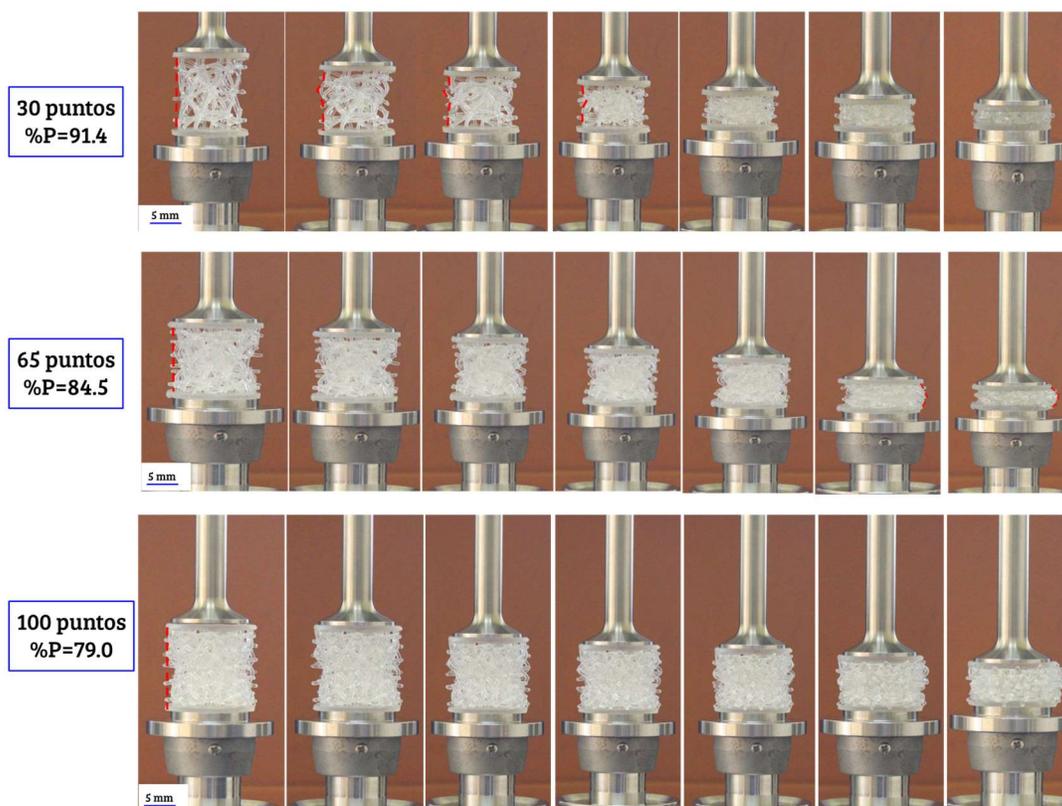
Nota. Las gráficas se obtuvieron directamente del reómetro DH2, las dimensiones de la geometría general se ingresan mediante la interfaz de la máquina (Figura 45). Sin embargo, es importante tomar en cuenta que la sección transversal no resulta sencilla determinar por la geometría de la estructura.

Como se puede observar, las estructuras presentan una deformación considerable para pequeñas cargas con un comportamiento parabólico semejante al caucho. Para el caso de la probeta S1-30 que corresponde a un porcentaje de porosidad del 91.4% presenta una elongación del 75.0% de su altura inicial (

Figura 46) con un esfuerzo de 0.08 MPa y un módulo de Young bajo con respecto a las otras dos estructuras, la de menor elongación es la probeta con 100 puntos con un porcentaje de 61.05%. Por otro lado, se observa que el cilindro sólido tiene un comportamiento diferente con una elongación no superior al 3.07 %

Figura 47

Respuestas a la compresión de estructuras porosas flexibles con diferente número de puntos bajo una deformación creciente del 0% al 70% (escala: 5 mm).



Nota. Las líneas punteadas rojas resaltan deformaciones visibles durante el ensayo de comprensión.

Las respuestas a la comprensión de las estructuras porosas aleatorias revelan un aparente acomodamiento de la red interna hasta asemejarse a un sólido compacto que ocasiona una mayor resistencia a la compresión y a deformarse. Sin embargo, se diferencian en el desplazamiento que les toma llegar a ese estado. La muestra de 30 puntos no presenta desbordamientos a los costados del área cilíndrica, su deformación es vertical y llegar a su mínima distancia (6 mm) le toma más tiempo con menos fuerza.

A continuación, se presenta el resumen de resultados de comportamiento mecánico de las estructuras ensayadas:

Tabla 8

Resultados obtenidos del ensayo de compresión en las 3 probetas.

Tipología de la estructura	Elongación %	Esfuerzo (MPa)	Módulo (MPa)	Distancia Final mm
Sólido	3.07	0.045	1.477	24.65
30 puntos	75.95	0.101	0.136	6.27
65 puntos	67.48	0.109	0.152	8.15
100 puntos	61.05	0.101	0.134	11.153

Análisis de deformación 2D de las estructuras porosas

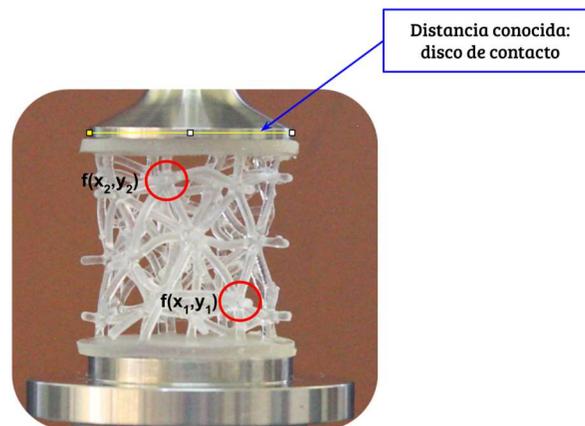
Generalmente, el tamaño de poro en estructuras porosas se encuentra en el rango de micro o nano escala. Por esta razón, su análisis se complementa con procesamiento de imágenes tomadas a nivel microscópico durante ensayos mecánicos o químicos (Ren et al., 2021) (Roberts et al., 2014) .

Como se observa en la caracterización de las estructuras porosas de este estudio, sus dimensiones facilitan la medición de desplazamientos o medidas dimensionales con instrumentos comunes. Sin embargo, la metodología de procesamiento de las imágenes que se presenta, puede fácilmente, aplicarse a estructuras porosas de dimensiones menores y facilitar su análisis de deformación.

Para este caso el factor de escala ingresado en Fiji es de 17.7874 pixeles/mm. Previo a establecer esta relación, se realizaron 5 mediciones de la distancia conocida (25mm) con su equivalente en pixeles, la media corresponde al parámetro *Distance in pixeles*. Las imágenes procesadas son 7 por cada estructura (Figura 47).

Figura 48

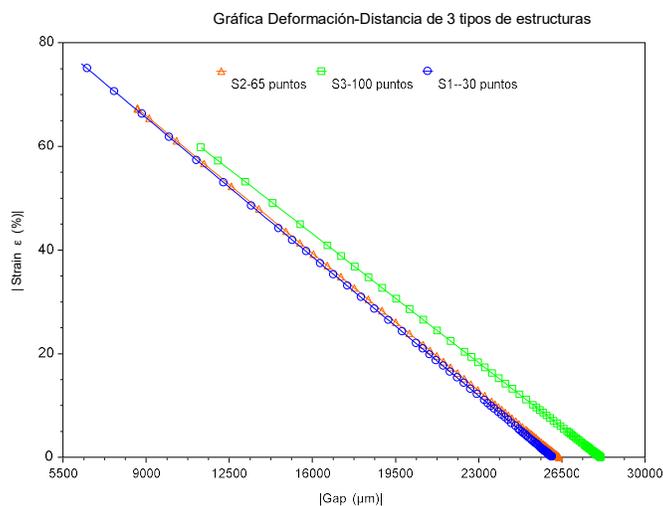
Distancia conocida y nodos de referencia para determinar el desplazamiento.



Nota. Los nodos de referencia pueden variar entre estructuras. Con las coordenadas x , y obtenidas del programa en pixeles, se puede determinar las distancias con la Ecuación 6 y su deformación con la Ecuación 7.

Figura 49

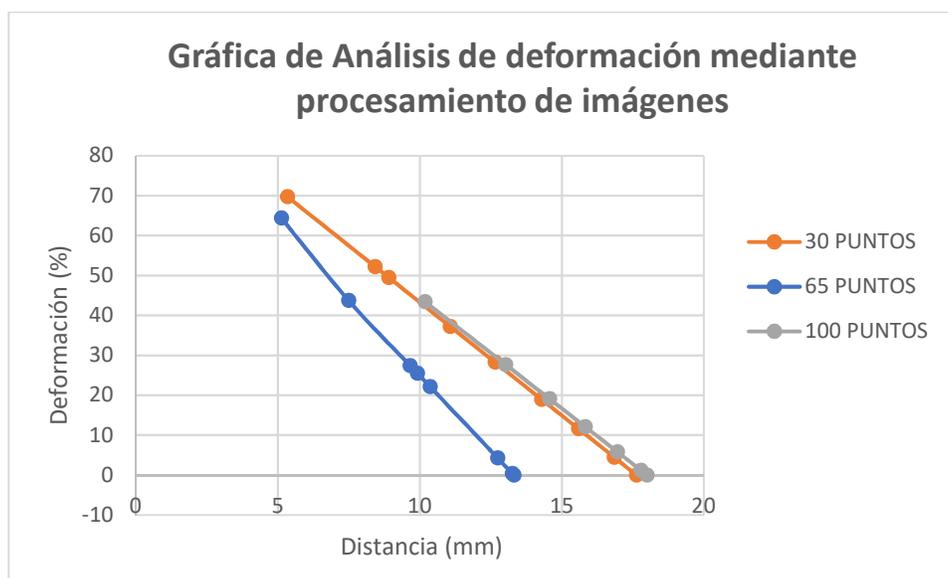
Gráfica Deformación - Distancia de 3 tipos de estructuras



Nota. La gráfica se obtuvo del programa TRIOS (TA Instruments) donde se almacenan todos los datos tomados de cada ensayo mecánico

Figura 50

Gráfica de deformación de estructuras porosas aleatorias mediante procesamiento de imágenes.



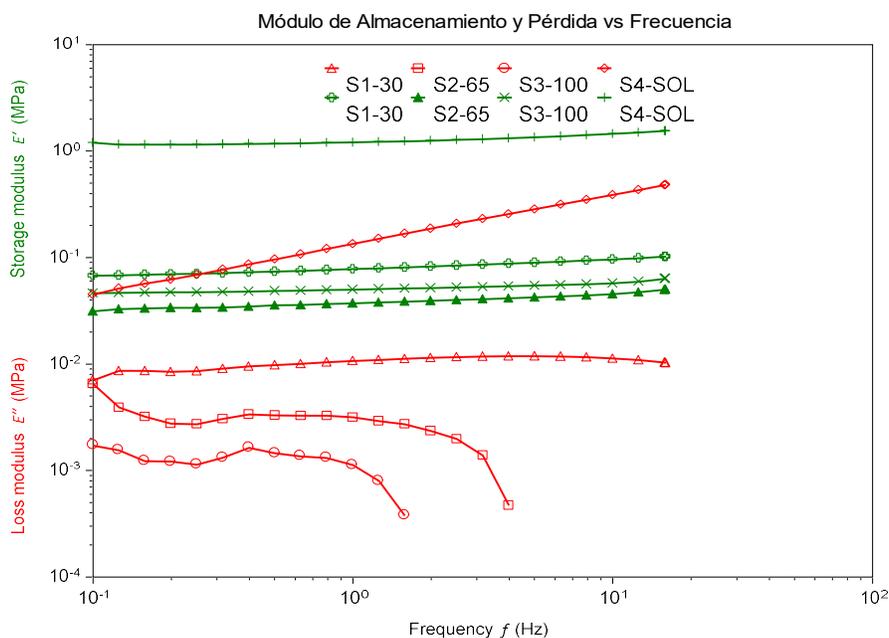
Como se puede observar mediante procesamiento de imágenes, se obtiene para la estructura porosa con 30 puntos, una deformación del 69.74% de una altura inicial de 17.62mm. Para el caso de la estructura porosa de 65 puntos se obtiene una deformación de 63.39 % de una altura inicial de 17.30 mm. Finalmente, la estructura porosa de 100 puntos, presenta una deformación de 43.45% con una altura inicial de 18.00 mm. (*Revisar ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*)

Análisis de validación conceptual

El estudio de propiedades dinámicas mecánicas de las estructuras porosas flexibles con la influencia de la frecuencia revela los siguientes resultados.

Figura 51

Gráfica de Módulo de almacenamiento y pérdida con un barrido de frecuencia en probetas porosas



Nota. El eje horizontal se encuentra en escala logarítmica con el fin de observar de mejor manera el comportamiento de cada estructura. Las líneas rojas corresponden al módulo de pérdida y las líneas verdes corresponden al módulo de almacenamiento de las estructuras.

En la gráfica se puede observar que las muestras S2 y S3 de color rojo presentan un comportamiento más elástico que el resto debido a que el módulo de pérdida es mucho menor al módulo de almacenamiento en un rango de 1 a 3 Hz. Por otro lado, el comportamiento del sólido se observa que para frecuencias bajas el módulo de pérdida es mucho menor al módulo de almacenamiento, es decir su comportamiento es elástico. Se distingue que a mayores frecuencias la diferencia entre ambos módulos se reduce, no obstante, predomina el módulo de almacenamiento.

De forma general, se observa que la estructura porosa con 30 puntos es más elástica que las estructuras con 65 y 100 puntos. Por otro lado, en cuanto a la cantidad de energía que se requiere para deformar la muestra, la probeta sólida requiere del doble de energía que las probetas porosas (Tabla 9).

Los valores bajos obtenidos en el factor de pérdida indican que las estructuras sufren deformaciones aún elásticas.

A continuación, se resume los datos más importantes, obtenidos del análisis dinámico mecánico de estructuras porosas:

Tabla 9

Parámetros dinámicos obtenidos del ensayo DMA

Tipología de la estructura	Módulo de almacenamiento MPa E'	Módulo de pérdida MPa E''	Factor de pérdida Tan (δ)
Sólido	1.5430	0.4883	0.3165
30 puntos	0.097	0.00092	0.0940
65 puntos	0.0577	-0.00965	-0.1672
100 puntos	0.0682	-0.0198	-0.2932

Nota. Los valores se obtuvieron de un barrido de frecuencia de 0.1 a 16 Hz.

Conclusiones

En la presente investigación se utilizó la técnica de manufactura aditiva conocida como Estereolitografía, empleando resina Elastic 50 A, como materia prima. El software *Rhino 7* (Robert McNeel & Associates, Barcelona) con su complemento *Grasshopper* es utilizado como herramienta de diseño y modelado CAD para la fabricación de estructuras porosas flexibles y obtener una plataforma de productos.

El diseño de la plataforma de productos es un recurso fundamental de prototipado, a partir de ésta se puede exportar directamente al software de impresión y luego enviar a la máquina para su fabricación aditiva. Gracias a la plataforma de productos, es posible comprobar in situ y sin necesidad de gastar material, si el diseño de estructura porosa es imprimible. En caso de observar fallas en el modelo, basta con volver al algoritmo de diseño y modificar los parámetros de entrada.

Con relación a la fabricación de las estructuras porosas, se ha identificado claramente la metodología para obtener el prototipo final sin defectos. Se evaluaron cuidadosamente parámetros como orientación, que de acuerdo a la terminología de la ASTM 52921, es B90 ZX, la orientación adecuada para evitar acumular resina en el interior de las estructuras. Por otro lado, la ubicación de soportes se establece con una densidad de 0.90, tamaño de punto de contacto de 0.40 para soportes internos y de 0.50 para soportes externos. El tiempo de curado de las estructuras porosas es de 30 min.

La caracterización de este tipo de estructuras nuevas, resulta esencial porque facilita la creación de materiales avanzados y prototipos innovadores en campos como la biomedicina o robótica blanda. En esta investigación se evaluaron 3 valores de porosidad 91.4%, 84.5 % y 79%. Los resultados obtenidos indican que existe una relación lineal entre el número de puntos (N) que se ubican dentro de la geometría y el porcentaje de porosidad, es decir, a menor cantidad de puntos mayor será su porcentaje de porosidad y viceversa. En cuanto a la permeabilidad experimental, de igual forma se observa una relación directa,

mientras más puntos se encuentren en la geometría, resulta menos permeable o impermeable.

Con respecto al comportamiento mecánico, se observa que la estructura porosa con 91.4% de porosidad de 30 puntos sufre una deformación del 75 % con un esfuerzo de 0,101 MPa. Por otro lado, las estructuras de 65 y 100 puntos, se deformaron con el mismo esfuerzo un 67% y 61 %, respectivamente. Según las necesidades, puede interesar una u otra configuración. Cabe destacar que posterior al ensayo se inspeccionaron visualmente las estructuras y no muestran ningún tipo de defecto o rotura.

Finalmente, la validación con prueba conceptual está enfocada en la ingeniería de tejidos, la herramienta de análisis es DMA, los resultados muestran que las estructuras diseñadas y fabricadas requieren de menor energía para deformarse sin perder su elasticidad, es decir su comportamiento predominante es elástico. De forma general, la estructura con 30 puntos es más elástica seguida por la de 100 puntos. Estos resultados se obtienen de someter las estructuras a un barrido de frecuencia de 0.1 a 16 Hz con el fin de simular condiciones fisiológicas.

Recomendaciones

Previo a la realización de cualquier impresión en resina, se recomienda realizar un estudio del comportamiento mecánico de material para bajo normas ASTM. De esta forma se tiene en contexto el comportamiento del material y que consideraciones adicionales tomar previo a imprimir aplicaciones puntuales.

Durante la etapa de post-procesamiento, tomar en cuenta que las resinas son fotocurables, de modo que una exposición prolongada al medio ambiente o luz solar contribuye con una incorrecta etapa de curación, de modo que es necesario controlar los tiempos de lavado y curación en un equipo especializado.

En el análisis de área de las estructuras porosas aleatorias, se identificaron varias capas sin área. Para corregir este aspecto y evaluar nuevamente las estructuras, se

recomienda emplear los bloques de programación *Silkwormslicer* para realizar el rebanado y calcular el área de cada capa desde el mismo programa de diseño, como en el caso del trabajo titulado “*Gemelo Digital para el proceso de Manufactura aditiva de estructuras porosas Mediante procesamiento digital con luz*” (Jumbo, 2021) .

Para realizar ensayos mecánicos, establecer un protocolo de pruebas. De esta forma se pueden abordar todos los aspectos desde confiabilidad de la máquina de ensayos hasta el acondicionamiento de probetas para el ensayo planificado.

Con respecto a la validación conceptual, se puede complementar el estudio de las estructuras porosas con un DMA en fluidos o solventes que simulen el plasma de la sangre y estudiar sus propiedades para futuras aplicaciones a nivel de tejido en seres humanos.

Trabajo Futuro

El desarrollo de este trabajo abarca varias aristas de caracterización de la estructura porosa. Sin embargo, se puede mejorar las técnicas de experimentación con instrumentación que brinde datos más precisos. De igual forma, es posible replicar el estudio y metodología desarrollada en este trabajo, en un material biocompatible como *BioMed* que permita realizar pruebas normalizadas in situ para reemplazo de tejido tisular dañado.

Bibliografía

- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017).
Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, *66*(2), 659–681.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- Catmull, E., & Clark, J. (1978). Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design*, *10*(6), 350–355. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(78\)90110-0](https://doi.org/10.1016/0010-4485(78)90110-0)
- Chen, H., Han, Q., Wang, C., Liu, Y., Chen, B., & Wang, J. (2020). Porous Scaffold Design for Additive Manufacturing in Orthopedics: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*, 609. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00609>
- Chua, C. K., Wong, C. H., & Yeong, W. Y. (2017). Benchmarking for Additive Manufacturing. En *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing* (pp. 181–212). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813489-4.00008-8>
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., & Ranzuglia, G. (2008). MeshLab: An Open-Source Mesh Processing Tool. *Eurographics Italian Chapter Conference*, 8 pages.
<https://doi.org/10.2312/localchaptorevents/italchap/italianchapconf2008/129-136>
- Cortez Tornello, P., montini ballarin, F., Gonzalez, M., Comas, D., Cuadrado, T., & Abraham, G. (2012). *Obtención y Caracterización de Estructuras Porosas para Aplicaciones Biomédicas*.
- Du, Q., Faber, V., & Gunzburger, M. (1999). Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms. *SIAM Review*, *41*(4), 637–676. <https://doi.org/10.1137/S0036144599352836>
- Fantini, M., & Curto, M. (2018). Interactive design and manufacturing of a Voronoi-based biomimetic bone scaffold for morphological characterization. *International Journal on*

- Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12(2), 585–596.
<https://doi.org/10.1007/s12008-017-0416-x>
- Fantini, M., Curto, M., & De Crescenzo, F. (2016). A method to design biomimetic scaffolds for bone tissue engineering based on Voronoi lattices. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(2), 77–90. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1172301>
- Feng, J., Fu, J., Lin, Z., Shang, C., & Li, B. (2018). A review of the design methods of complex topology structures for 3D printing. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 1(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s42492-018-0004-3>
- Florez, J. P., Valdivieso, M. V., Arias, L. H., & Gómez, S. R. (2008). *Elastómeros de poliuretano a partir de aceite de higuera y almidón de yuca modificado químicamente: síntesis y propiedades fisicoquímicas, fisicomecánicas y térmicas*.
- Form 3 o Form 2: Comparación de las impresoras 3D de escritorio de Formlabs*. (s/f). Formlabs. Recuperado el 3 de febrero de 2023, de <https://formlabs.com/latam/blog/form-3-form-2-comparacion-impresion-3d/>
- Formlabs. (2019). *Elastic 50A*. <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001420-TDS-ENUS-0.pdf>
- Friedrich, E. (2008). *The Voronoi diagram in structural optimisation*. 90.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- 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>
- Herath, B., Suresh, S., Downing, D., Cometta, S., Tino, R., Castro, N. J., Leary, M., Schmutz, B., Wille, M.-L., & Hutmacher, D. W. (2021). Mechanical and geometrical study of 3D

- printed Voronoi scaffold design for large bone defects. *Materials & Design*, 212, 110224.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110224>
- Horgan, G. W. (1999). An investigation of the geometric influences on pore space diffusion. *Geoderma*, 88(1–2), 55–71. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00075-5)
- Jumbo, I. (2021). *Gemelo Digital para el proceso de fabricación aditiva de estructuras porosas mediante procesamiento digital con luz*. Repositorio ESPE
- Kanwar, S., & Vijayavenkataraman, S. (2021). Design of 3D printed scaffolds for bone tissue engineering: A review. *Bioprinting*, 24, e00167.
<https://doi.org/10.1016/j.bprint.2021.e00167>
- Lara-Padilla, H. (2018). *Fabrication of porous scaffolds using additive manufacturing with potential applications in bone tissue engineering*. Tecnológico de Monterrey.
- Lee, D. H., Kim, W., Song, J. E., & Khang, G. (2022). Prospects of collagen scaffolds for muscle regeneration. En *Tissue Engineering* (pp. 347–361). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824064-9.00006-X>
- Luo, Y., Le Fer, G., Dean, D., & Becker, M. L. (2019). 3D Printing of Poly(propylene fumarate) Oligomers: Evaluation of Resin Viscosity, Printing Characteristics and Mechanical Properties. *Biomacromolecules*, 20(4), 1699–1708.
<https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00076>
- Moroni, L., de Wijn, J. R., & van Blitterswijk, C. A. (2006). 3D fiber-deposited scaffolds for tissue engineering: Influence of pores geometry and architecture on dynamic mechanical properties. *Biomaterials*, 27(7), 974–985.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.07.023>
- Mousapour, M. (2020). *Multi-metal 3D printing with extrusion method*. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/346925646_Multi-metal_3D_printing_with_extrusion_method#fullTextFileContent

- Nawrat, Z. (2020). Robin Heart surgical robot: Description and future challenges. En *Control Systems Design of Bio-Robotics and Bio-mechatronics with Advanced Applications* (pp. 75–113). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817463-0.00003-4>
- Nguyen, D. S., & Vignat, F. (2016). A method to generate lattice structure for Additive Manufacturing. *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 966–970. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2016.7798021>
- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, *13*(4), 598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- Park, K.-M., Min, K.-S., & Roh, Y.-S. (2021). Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements. *Materials*, *15*(1), 97. <https://doi.org/10.3390/ma15010097>
- Pelanconi, M., Rezaei, E., & Ortona, A. (2020). Cellular ceramic architectures produced by hybrid additive manufacturing: A review on the evolution of their design. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, *128*(9), 595–604. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.20071>
- Pellegrino, J., Makila, T., McQueen, S., & Taylor, E. (2016). *Measurement science roadmap for polymer-based additive manufacturing* (NIST AMS 100-5; p. NIST AMS 100-5). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-5>
- Pérez, M., Carou, D., Rubio, E. M., & Teti, R. (2020). Current advances in additive manufacturing. *Procedia CIRP*, *88*, 439–444. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.076>
- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. *Materials Today: Proceedings*, *5*(2), 3873–3882. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>

- Ren, Z., Xie, H., & Ju, Y. (2021). Determination of the stress and strain fields in porous structures by photoelasticity and digital image correlation techniques. *Polymer Testing*, *102*, 107315. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107315>
- Renders, G. A. P., Mulder, L., van Ruijven, L. J., & van Eijden, T. M. G. J. (2007). Porosity of human mandibular condylar bone. *Journal of Anatomy*, *210*(3), 239–248. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2007.00693.x>
- Roberts, B. C., Perilli, E., & Reynolds, K. J. (2014). Application of the digital volume correlation technique for the measurement of displacement and strain fields in bone: A literature review. *Journal of Biomechanics*, *47*(5), 923–934. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.01.001>
- Romaniak, K., & Filipowski, S. (2018). *Parametric design in the education of architecture students*.
- Shahabi, C., & Sharifzadeh, M. (2009). Voronoi Diagrams. En L. Liu & M. T. Özsu (Eds.), *Encyclopedia of Database Systems* (pp. 3438–3440). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_451
- Shavandi, A., Hosseini, S., Okoro, O. V., Nie, L., Eghbali Babadi, F., & Melchels, F. (2020). 3D Bioprinting of Lignocellulosic Biomaterials. *Advanced Healthcare Materials*, *9*(24), 2001472. <https://doi.org/10.1002/adhm.202001472>
- Simoneau, C., Brailovski, V., & Terriault, P. (2016). Design, manufacture and tensile properties of stochastic porous metallic structures. *Mechanics of Materials*, *94*, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.11.010>
- Ultrasonic Cleaner BK-2400*. (s/f). Recuperado el 30 de enero de 2023, de <http://www.bakutool.com/ultrasonic-cleaner-ba-2400.html>
- Yilgor, P., Sousa, R. A., Reis, R. L., Hasirci, N., & Hasirci, V. (2008). 3D Plotted PCL Scaffolds for Stem Cell Based Bone Tissue Engineering. *Macromolecular Symposia*, *269*(1), 92–99. <https://doi.org/10.1002/masy.200850911>

Zhang, M., Shang, J., Guo, S., Hur, B., & Yue, X. (2020). Numerical Investigation of Effective Thermal Conductivity of Strut-Based Cellular Structures Designed by Spatial Voronoi Tessellation. *Materials*, 14(1), 138. <https://doi.org/10.3390/ma14010138>

Zhecheng, X., & Yuefeng, Z. (2020). *Voronoi Bicycle Helmet*.
<https://competition.adesignaward.com/design.php?ID=88697>

Apéndices