

Diseño y desarrollo de estructuras TPMS para propósitos de Ingeniería

Pedro Abril-Alvarado¹, Christian Cobos-Maldonado², Santiago Ferrándiz-Bou³, Luis Garzón-Muñoz⁴

¹ Grupo de investigación Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Proceso de Transformación (GIMAT), Carrera de Mecánica, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador. Email: pabrila@est.ups.edu.ec

² Grupo de investigación Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Proceso de Transformación (GIMAT), Carrera de Mecánica, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador. Email: ccobos@ups.edu.ec

³ Demes, Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Depto. Ingeniería Mecánica y Materiales Universitat Politècnica de Valencia, España. Email: sferrand@mcm.upv.es

⁴ Grupo de investigación Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Proceso de Transformación (GIMAT), Carrera de Mecánica, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador. Email: lgarzon@ups.edu.ec

Resumen

La presente investigación aborda el diseño y desarrollo de estructuras TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces), destinadas a diversas aplicaciones de ingeniería. Estas estructuras presentan características muy interesantes y son altamente versátiles, debido a que su naturaleza combina ligereza, porosidad y alta resistencia, esto las hace ideales para una diversa gama de aplicaciones como membranas estructuradas, intercambiadores de calor, implantes bio-médicos, entre otros. La investigación se centra en explorar y aprovechar estas características para impulsar innovaciones significativas en distintas áreas de ingeniería. Estas estructuras fueron obtenidas por estereolitografía SLA utilizando materiales biocompatibles para su estudio dimensional.

Palabras clave: Superficie Mínima Triplemente Periódica TPMS, estereolitografía SLA, biocompatible, manufactura aditiva AM.

Abstract

This research addresses the design and development of TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces) structures, intended for various engineering applications. These structures have very interesting characteristics and are highly versatile, because their nature combines lightness, porosity and high resistance, this makes them ideal for a diverse range of applications such as structured membranes, heat exchangers, biomedical implants, among others. Research focuses on exploring and leveraging these characteristics to drive significant innovations in different areas of engineering. These structures were obtained by SLA stereolithography using biocompatible materials for their dimensional study.

Keywords: Triply Periodic Minimal Surfaces TPMS, SLA stereolithography, biocompatible, AM additive manufacturing.

1. Introducción

En los últimos años, las técnicas de manufactura aditiva (AM) han sido ampliamente utilizadas para la elaboración de estructuras sólidas y también estructuras con un grado de porosidad y alta complejidad, como lo son un novedoso grupo de estructuras con propiedades muy interesantes, conocidas como Superficies Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS), las cuales tienen propiedades mecánicas, eléctricas, acústicas, térmicas y de flujo de fluidos únicas [1, 2], diferentes según el tipo de arquitectura. Se trata de un tipo de estructuras de

curvatura media igual a cero y se repiten de manera periódica en tres direcciones [2]. Estas estructuras han requerido nuevas metodologías de manufactura en distintos materiales. Las celdas unitarias periódicas, comúnmente utilizadas en estructuras porosas pueden no ser ideales para trabajar bajo cargas multiaxiales [3], pero aún presentan interesantes propiedades.

La compleja topología de las estructuras TPMS puede ser modeladas en un software computacional como nTop™, MSLattice, o usar el lenguaje de programación de Python o MATLAB™ para crear modelos y exportarlos en el formato de impresión 3D (STL) a partir de la función que describe la superficie.

Mediante estas herramientas se pueden tanto crear modelos matemáticos como utilizar algunos ya conocidos, con los que se puede controlar las dimensiones de una TPMS y su arquitectura, permitiendo analizar propiedades físicas y mecánicas para distintas aplicaciones, tales como: acústicas, transferencia de calor, absorción de energía de impacto, etc. [4 - 11].

La plataforma de nTop™ permite un modelado a partir de las ecuaciones implícitas de las celosías complejas, y se reduce el gran tamaño de datos que se manejan con otras técnicas de modelado [12]. Recientes trabajos realizados utilizando estructuras TPMS obtenidas por manufactura aditiva de filamento fundido (FFF), con material base PLA mostraron diferentes resultados experimentales y propiedades mecánicas, según el tipo de arquitectura [13]. Es posible fabricar estructuras TPMS de alta complejidad y calidad por medio de impresión 3D FFF, en materiales blandos (PBAT comercial (HENGLIECO KHB21BP11)) [14], así como también se puede fabricar mediante otras técnicas, como por ejemplo, la sinterización selectiva por láser (SLS), que utilizó Goodyear™, para fabricar llantas de auto, no neumáticas, a partir de caucho en polvo reciclado [12].

También se han desarrollado estructuras TPMS para andamios de ingeniería de tejido de hueso [7, 8], [15 - 21]. La bioimpresión y manufactura aditiva pueden provocar un alto impacto en la industria biomédica y medicina [8]; un estudio reciente utilizó el modelado por deposición fundida (FDM), con lo que se desarrolló un andamio PLA/GO (ácido poliláctico con óxido de grafeno) para evaluar distintas propiedades, tanto celulares como mecánicas [9].

Otro estudio utiliza en cambio la fusión selectiva por láser (SLM), la cual permite utilizar materiales metálicos, uno de los más utilizados para implantes médicos es Ti₆Al₄V, debido a su biocompatibilidad [10]. Varios investigadores han desarrollado estructuras Gyroid las cuales han sido analizadas mediante elementos finitos determinando su respuesta frente a la actividad biológica celular, variando la porosidad de la estructura [6].

Se ha mostrado la relación entre la densidad relativa de aleación metálica porosa Ti₆Al₄V EFI (Implant Grade) como Ti₆Al₄V ELI (Extra Low Interstitials) y las propiedades compresivas del material; no solo se encontraron diferentes propiedades mecánicas entre los diferentes tipos de celdas unitarias, sino también distintos mecanismos de deformación y falla según la arquitectura [23].

La permeabilidad de los andamios es un factor crucial en cuanto a la transmisión de nutrientes, cada diseño de celda unitaria tiene un efecto notable en la permeabilidad del andamio [24].

Otro método para el diseño de estructuras TPMS es por medio de códigos de programación del software MATLAB™, con él, se pueden construir las

geometrías complejas mediante las ecuaciones implícitas de cada tipo de celda. Éste software, además nos permite exportar las geometrías en formato STL para su fabricación [9].

Las estructuras TPMS son candidatos muy prometedores para una amplia gama de aplicaciones de ingeniería, debido a que muestran propiedades mecánicas superiores en comparación con otros tipos de estructuras celulares [25], así como ligereza. El diseño TPMS Gyroid, debido a sus propiedades mecánicas, porosas (de crecimiento óseo) y de fabricación, ha demostrado ser un diseño factible de andamio [21].

Dos aspectos importantes a tomar en cuenta para el crecimiento óseo es el área de superficie específica, con lo que podemos predecir el área de absorción celular y el otro es la permeabilidad, con la que se puede analizar la capacidad del andamio para facilitar la comunicación celular [26]. El tamaño de poro adecuado para el crecimiento celular, se ha reportado entre 400 y 1300 μm, utilizando celdas de 1 mm³ [27]; el tamaño de poro varía según el tipo de celda unitaria, el espesor de pared y otros valores.

El presente trabajo describe la metodología utilizada para el desarrollo de estructuras TPMS que pueden ser utilizadas en ingeniería tisular, partiendo de la parametrización de modelos matemáticos utilizando software CAD nTop™ y su fabricación por medio de manufactura aditiva por estereolitografía láser (SLA) debido a la precisión y calidad de detalles complejos, excelente calidad superficial. Éste método de fabricación ofrece una mejor respuesta mecánica frente a otros métodos de fabricación, debido a que no se crean líneas de capa y no existe espacio a inicios de fractura.

[28].

2. Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo de las celdas unitarias y de las probetas se basa en modelado computacional y experimental. En la figura 1 se muestra el flujograma de la metodología utilizada.

Se utilizó el software de modelado y simulación nTop™, utilizando 5 diferentes modelos matemáticos, controlando las siguientes variables: espesor de pared, tamaño de celda y con ello la porosidad.

2.1. Modelado 3D

Éstas estructuras se diseñan mediante ecuaciones implícitas, donde (t) es el espesor de pared de la celda unitaria, y las cuales se generan directamente en nTop™, y mediante el ingreso de valores en el árbol de operaciones se controlan los parámetros necesarios.

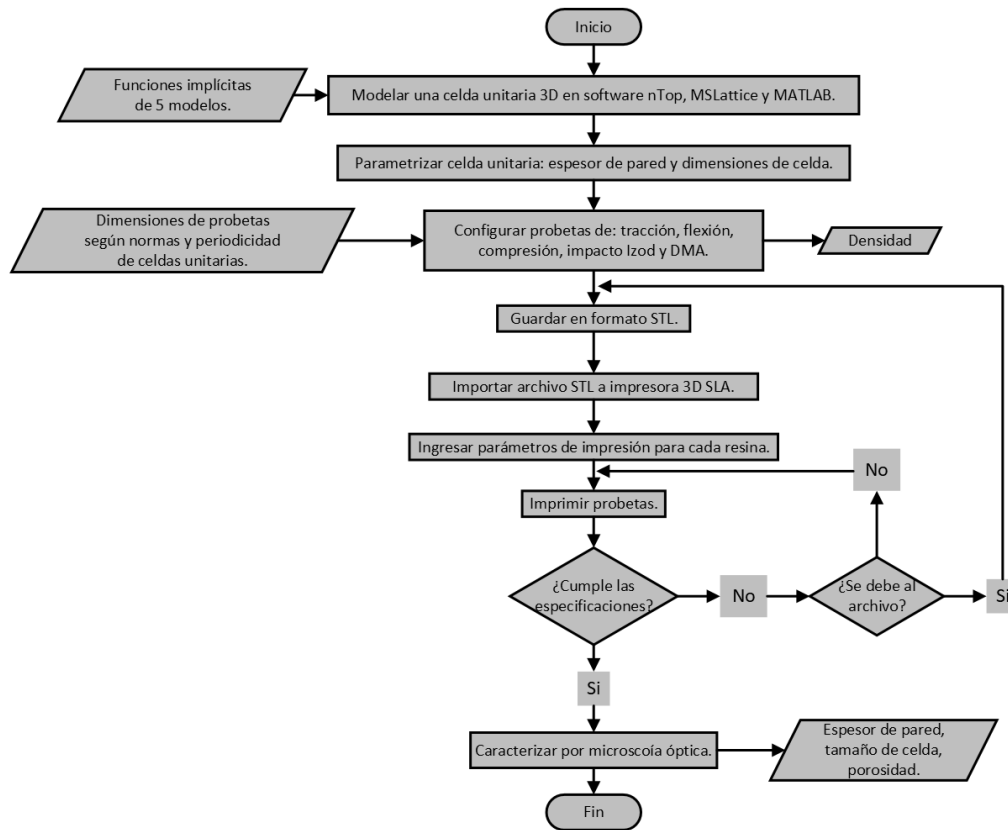


Figura 1. Diagrama de flujo de metodología utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Las funciones utilizadas para el estudio son: Schwarz P, Split P, Diamond, Gyroid, y Lidinoid. Para el modelado 3D se utilizaron los softwares nTop™, MSLattice y MATLAB, por medio de funciones implícitas.

2.2. Celdas unitarias

A continuación, se presentan las celdas unitarias que describe cada una de las ecuaciones elegidas, realizadas en nTop™.

Schwarz P:

$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = t \quad (1)$$



Figura 2. Celda unitaria Schwarz P, elaborada en nTop™. Fuente: elaboración propia.

Gyroid:

$$\begin{aligned} \sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y) \cdot \cos(z) + \sin(z) \cdot \cos(x) \\ \cos(x) = t \end{aligned} \quad (2)$$



Figura 3. Celda unitaria Gyroid, elaborada en nTop™. Fuente: elaboración propia.

Diamond:

$$\begin{aligned} \sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) \\ + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) = t \end{aligned} \quad (3)$$



Figura 4. Celda unitaria Diamond, elaborada en nTop™. Fuente: elaboración propia.

Split P:

$$1.1(\sin(2 \cdot x) \cdot \sin(z) \cdot \cos(y) + \sin(2 \cdot y) \cdot \sin(x) \cdot \cos(z) + \sin(2 \cdot z) \cdot \sin(y) \cdot \cos(x)) - 0.2 \cdot (\cos(2 \cdot x) \cdot \cos(2 \cdot y) \cdot \cos(2 \cdot y) \cdot \cos(2 \cdot z) \cdot \cos(2 \cdot z) \cdot \cos(2 \cdot x)) - 0.4 \cdot (\cos(2 \cdot x) + \cos(2 \cdot y) + \cos(2 \cdot z)) = t \quad (4)$$

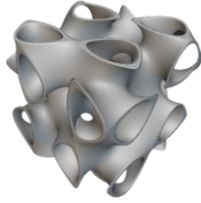


Figura 5. Celda unitaria Split P, elaborada en nTop™.
Fuente: elaboración propia.

Lidinoid:

$$\left(\frac{1}{2}\right) \cdot [\sin(2 \cdot x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) + \sin(2 \cdot y) \cdot \cos(z) \cdot \sin(x) + \sin(2 \cdot z) \cdot \cos(x) \cdot \sin(y)] - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot [\cos(2 \cdot x) \cdot \cos(2 \cdot y) + \cos(2 \cdot y) \cdot \cos(2 \cdot z) + \cos(2 \cdot z) \cdot \cos(2 \cdot x)] + 0.15 = t \quad (5)$$

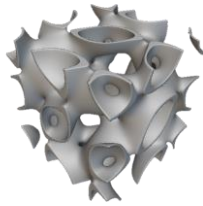


Figura 5. Celda unitaria Lidinoid, elaborada en nTop™.
Fuente: elaboración propia.

Algunos parámetros importantes de las estructuras TPMS son tamaño de poro, espesor de pared, tamaño de celda, y densidad relativa y estos parámetros se controlan mediante el software de modelado.

2.3. Configuración de probetas

Partiendo de las celdas unitarias se configuran probetas para ensayos mecánicos de tracción (ASTM D638), flexión (ASTM D790), compresión (ASTM D695), impacto Charpy (ASTM D6110), y DMA (Dynamic Mechanical Analysis) (ASTM D4065).

Para el dimensionamiento de la probeta se consideró la periodicidad, el tamaño de celda y el espesor de pared (t). Los espesores de pared utilizados son: 0.34 mm, 0.68 mm y 1.00 mm; y el tamaño de celda unitaria es 7mm×7mm×7mm.

Probeta de tracción:

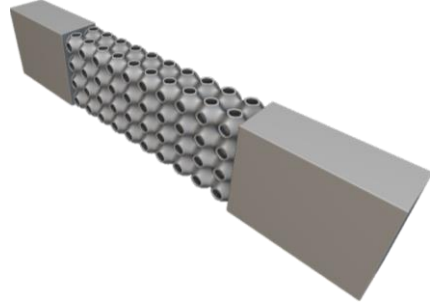


Figura 7. Probeta de tracción, elaborada en nTop™.
Fuente: elaboración propia.

La probeta de tracción tiene unas dimensiones generales de: largo: 14mm, ancho: 28mm, altura: 140mm. Las mismas se diseñaron con extremos sólidos de 35mm de altura, los cuales servirán para evitar que las mordazas fracturen la estructura cuando se sujeten en la máquina universal de ensayos.

Probeta de compresión:

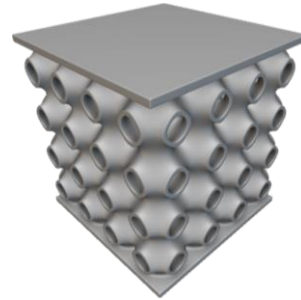


Figura 8. Probeta de compresión, elaborada en nTop™, celda Schwarz P. Fuente: elaboración propia.

La probeta de compresión tiene dimensiones de 28mm×28mm×28mm, con dos superficies planas de 1mm de espesor para asegurar una distribución uniforme de cargas

Probeta de flexión:

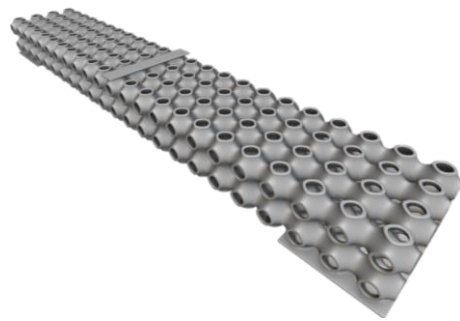


Figura 9. Probeta de flexión, elaborada en nTop™, celda Schwarz P. Fuente: elaboración propia.

La probeta de flexión tiene unas dimensiones generales de: 161 mm x 28mm x, 14mm. Se diseñaron con superficies de 1mm de espesor en los puntos de apoyo para asegurar la correcta distribución de esfuerzos durante el ensayo mecánico.

Probeta de impacto Charpy:



Figura 10. Probeta de impacto Charpy, elaborada en nTop™, celda Schwarz P. Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones de la probeta de impacto Charpy son 7 mm x 14 mm x 84mm.

Probeta de DMA:

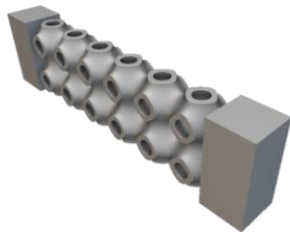


Figura 11. Probeta de DMA, elaborada en nTop™, celda Schwarz P. Fuente: elaboración propia.

La probeta de ensayo DMA se diseñó con celdas de 5mm, con dimensiones generales de 5 mm x 10 mm x 40 mm de alto, de los cuales en cada extremo existen partes sólidas de 5mm de altura para evitar las fracturas en la sujeción.

Este grupo de estructuras TPMS son estructuras porosas interconectadas en toda la dimensionalidad de la celda.

Esto es beneficioso para un propósito de crecimiento celular o andamio de tejido, pues permite que las células puedan crecer y proliferar en ese espacio. Por ello es importante el tamaño del poro para asegurar la supervivencia y los procesos vitales que la célula necesita realizar; por otro lado, es posible analizar la influencia del espesor de pared en la respuesta mecánica de cada una de las diferentes estructuras.

2.4. Manufactura

Para cada uno de las cinco ecuaciones de las estructuras (Schwarz, Gyroid, Diamond, Split P y Lidinoid) se crearon los cinco modelos de probetas (tracción, compresión, flexión, Charpy y DMA) con tres diferentes espesores de pared (0.34 mm, 0.68mm y 1 mm). Se obtiene 60 probetas para ser fabricadas con cada una de las resinas.

Se exportan las probetas en archivos de formato STL, con una calidad de malla suficientemente alta, para no perder detalles de la estructura, pero evitando el exceso de nodos para evitar un alto costo computacional.

Para la fabricación de las probetas se utilizó manufactura aditiva de estereolitografía láser SLA. Se optó por este método de impresión debido a la precisión de 34 µm que ofrece esta tecnología, y a los materiales utilizados, la resina Aqua 4K Gray y Beige Low Irritation, ambas de Phrozen. La impresora utilizada fue AnyCubic Photon M3 Plus.

Los parámetros de impresión utilizados con cada resina se describen a continuación:

Tabla 1. Parámetros de impresión para resina Aqua 4K Gray.

Parámetro	Medida
Altura de capa	0.05 mm
Recuento de capas inferiores	6
Tiempo de exposición	2.5 s
Tiempo de exposición inferior	42.05 s
Recuento de capas de transición	6
Tipo de transición	Lineal
Disminución del tiempo de transición	5.65 s
Retraso de apagado	0.5 s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Parámetros de impresión para resina Beige Low Irritation.

Parámetro	Medida
Altura de capa	0.05 mm
Recuento de capas inferiores	6
Tiempo de exposición	3.2 s
Tiempo de exposición inferior	42.05 s
Recuento de capas de transición	6
Tipo de transición	Lineal
Disminución del tiempo de transición	5.55 s
Retraso de apagado	0.5 s

Fuente: elaboración propia.

2.5. Caracterización óptica

Para verificar la morfología de las probetas se utilizó un microscopio Stemi 508 equipado con una cámara

Zeiss Axiocam 20838 en combinación con la aplicación Zeiss Labscope.

Las micrografías se tomaron con varios aumentos, iluminación transmitida y en modo de captura digital.

3. Resultados

Se obtuvieron varias probetas con cada una de las resinas, lo que nos permite evaluar tres diferentes espesores de pared en 5 modelos de celdas unitarias, el tamaño real de las celdas, la densidad y la porosidad de las probetas.

3.1. Diseño Geométrico

Se obtuvieron 5 diferentes geometrías TPMS, en formato de probetas para diferentes ensayos.

Los espesores de pared (t) utilizados son: 0.34 mm, 0.68 mm y 1.00 mm; lo que en combinación con el tamaño de celda (7 mm x 7 mm x 7 mm), permite controlar el tamaño de poro y la densidad de cada arquitectura. Ninguno de los espesores representó un problema para la impresión.

7mm

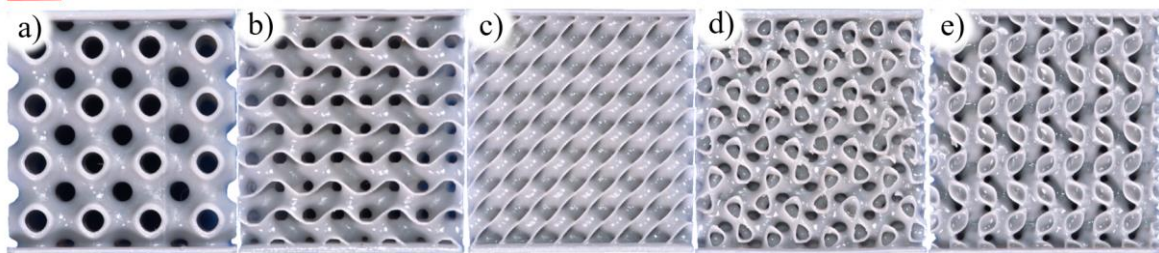


Figura 14. Estructuras con espesor de pared $t = 0.34 \text{ mm}$ a) Schwarz P, b) Gyroid, c) Diamond, d) Split P, e) Lidinoid. Fuente: elaboración propia.

7mm

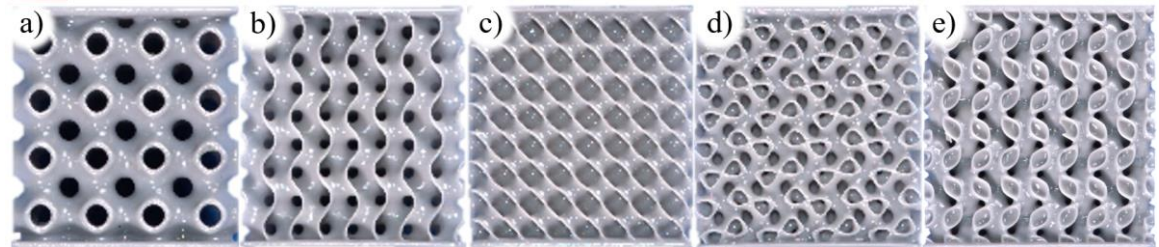


Figura 14. Estructuras con espesor de pared $t = 0.68 \text{ mm}$ a) Schwarz P, b) Gyroid, c) Diamond, d) Split P, e) Lidinoid. Fuente: elaboración propia.

7mm

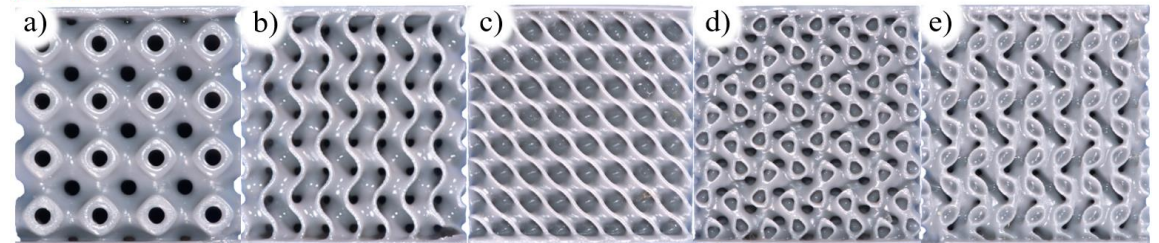


Figura 14. Estructuras con espesor de pared $t = 1.00 \text{ mm}$ a) Schwarz P, b) Gyroid, c) Diamond, d) Split P, e) Lidinoid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Densidad de cada estructura TPMS.

Estructura	Espesor de Pared		
	$t=0,34mm$	$t=0,68mm$	$t=1,00mm$
Schwarz P	0.383g/cc	0.425g/cc	0.595g/cc
Gyroid	0.255g/cc	0.298 g/cc	0.468g/cc
Diamond	0.340g/cc	0.383g/cc	0.553g/cc
Split P	0.468g/cc	0.510g/cc	0.638g/cc
Lidinoid	0.680g/cc	0.697g/cc	0.850g/cc

Fuente: elaboración propia.

3.2. Probetas Obtenidas

Las siguientes imágenes corresponden a las probetas de 0.68mm de espesor de pared, obtenidas con la resina Aqua 4K Gray; para ensayos de compresión.

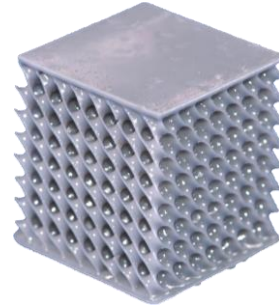
Schwarz P

**Figura 9.** Probeta de compresión Schwarz P, $t=0.68mm$.
Fuente: elaboración propia.

Gyroid

**Figura 10.** Probeta de compresión Gyroid, $t=0.68mm$.
Fuente: elaboración propia.

Diamond

**Figura 11.** Probeta de compresión Diamond, $t=0.68mm$.
Fuente: elaboración propia.

Split P

**Figura 12.** Probeta de compresión Split P, $t=0.68mm$.
Fuente: elaboración propia.

Lidinoid

**Figura 13.** Probeta de compresión Lidinoid, $t=0.68mm$.
Fuente: elaboración propia.

3.3. Verificación de las probetas

La morfología de las probetas fue verificada mediante un microscopio Stemi 508. Se evidenció un buen acabado superficial y uniformidad geométrica, esto se debe al método de fabricación por SLA, con una altura de capa de 0.05 y a que no se requiere la utilización de

soportes para la impresión de las estructuras, ésta es una significativa ventaja en comparación con otros métodos de impresión, los cuales suelen dejar marcas de soportes e imperfecciones.

Además, con las micrografías obtenidas con la cámara Zeiss Axiocam 20838, se pudo evaluar el tamaño del poro y el espesor de pared gracias a la aplicación Zeiss Labscope.

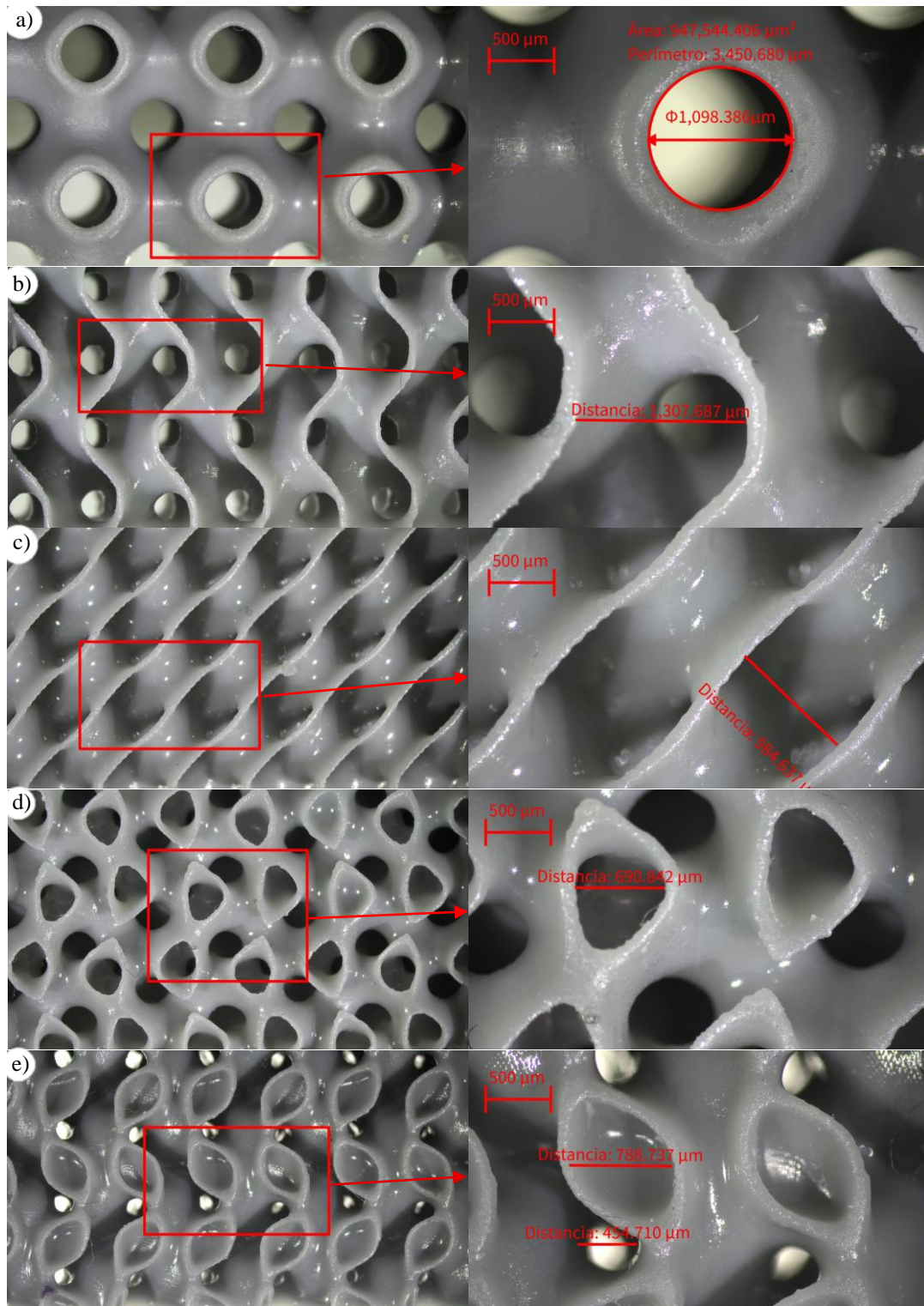


Figura 14. Micrografía de estructuras $t=0,34\text{mm}$ a) Schwarz P, b) Gyroid, c) Diamond, d) Split P, e) Lidinoid.
Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Con el desarrollo de las estructuras TPMS se evidenció la eficacia de fabricación de geometrías complejas por medio de SLA. Se evidencia además que el control del espesor de pared y el tamaño de celda permiten ajustar la porosidad y densidad de las estructuras, lo cual es crucial para aplicaciones de ingeniería tisular. La estructura Lidinoid es la que presenta el menor tamaño de poro, 457,71µm; Gyroid presenta el mayor tamaño de poro, 1307,69µm además es la estructura que presenta menor densidad.

El control del espesor de pared y el tamaño de la celda abre el camino a futuros estudios que puedan evaluar la relación entre las propiedades mecánicas y biológicas de éstas estructuras como puede ser la absorción de impactos, resistencia a la compresión, flexión, tracción, etc., para lo cual se desarrollaron las distintas probetas según los estándares de la norma ASTM. La versatilidad de las estructuras TPMS con la capacidad de ser personalizadas en términos de porosidad, densidad o espesor de pared permite que tengan aplicaciones más allá de la ingeniería tisular, como la transferencia de calor, membranas permeables, absorción de energía, aspectos para los que se requiere un estudio detallado en futuros trabajos.

5. Agradecimientos

Agradecemos la disposición y el profesionalismo del equipo de nTopTM, por facilitarnos la licencia de acceso al software nTop, el cual ha sido fundamental para la realización de este proyecto de investigación.

6. Referencias

- [1] SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges, *Mater. Des.*, vol. 183, p. 108137, dic. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
- [2] F. Raja, Evaluation of Properties of Triply Periodic Minimal Surface Structures Using ANSYS. PhD thesis, Arizona State University, 2019.
- [3] U. Hossain, S. Ghouse, K. Nai, y J. R. Jeffers, Controlling and testing anisotropy in additively manufactured stochastic structures, *Addit. Manuf.*, vol. 39, p. 101849, mar. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101849.
- [4] Y. Zhang *et al.*, Adaptive enhancement design of triply periodic minimal surface lattice structure based on non-uniform stress distribution, *Appl. Math. Mech.*, vol. 44, n.º 8, pp. 1317-1330, ago. 2023, doi: 10.1007/s10483-023-3013-9.
- [5] N. Sathishkumar, N. Arunkumar, S. V. Rohith, y R. R. Hariharan, Effect of varying unit cell size on energy absorption behaviour of additive manufactured TPMS PETG lattice structure, *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 8, n.º 6, pp. 1379-1391, dic. 2023, doi: 10.1007/s40964-023-00407-w.
- [6] D. Ali y S. Sen, Finite element analysis of mechanical behavior, permeability and fluid induced wall shear stress of high porosity scaffolds with gyroid and lattice-based architectures, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 75, pp. 262-270, nov. 2017, doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.07.035.
- [7] C. Bonatti y D. Mohr, Mechanical performance of additively-manufactured anisotropic and isotropic smooth shell-lattice materials: Simulations & experiments, *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 122, pp. 1-26, ene. 2019, doi: 10.1016/j.jmps.2018.08.022.
- [8] Z.-H. Lin, J.-H. Pan, y H.-Y. Li, Mechanical Strength of Triply Periodic Minimal Surface Lattices Subjected to Three-Point Bending, *Polymers*, vol. 14, n.º 14, p. 2885, jul. 2022, doi: 10.3390/polym14142885.
- [9] U. Simsek, A. Akbulut, C. E. Gayir, C. Basaran, y P. Sendur, Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling methods, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 115, n.º 3, pp. 657-674, jul. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06174-0.
- [10] O. Al-Ketan y R. K. Abu Al-Rub, Multifunctional Mechanical Metamaterials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 21, n.º 10, p. 1900524, 2019, doi: 10.1002/adem.201900524.
- [11] F. Hesselmann *et al.*, Structure-dependent gas transfer performance of 3D-membranes for artificial membrane lungs, *J. Membr. Sci.*, vol. 634, p. 119371, sep. 2021, doi: 10.1016/j.memsci.2021.119371.
- [12] Design of 3D printable airless tyres using NTopology, *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 1147-1160, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.058.
- [13] N. Kladovasilakis, K. Tsongas, y D. Tzetzis, Mechanical and FEA-Assisted Characterization of Fused Filament Fabricated Triply Periodic Minimal Surface Structures, *J. Compos. Sci.*, vol. 5, n.º 2, Art. n.º 2, feb. 2021, doi: 10.3390/jcs5020058.
- [14] Design and mechanical evaluation of additively-manufactured graded TPMS lattices with biodegradable polymer composites, *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 23, pp. 2868-2880, mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.01.221.
- [15] N. S. Mustafa *et al.*, Application of Computational Method in Designing a Unit Cell of Bone Tissue Engineering Scaffold: A Review, *Polymers*, vol. 13, n.º 10, Art. n.º 10, ene. 2021, doi: 10.3390/polym13101584.

- [16] 3D printed TPMS structural PLA/GO scaffold: Process parameter optimization, porous structure, mechanical and biological properties, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 142, p. 105848, jun. 2023, doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.105848.
- [17] X.-Y. Zhang, G. Fang, y J. Zhou, Additively Manufactured Scaffolds for Bone Tissue Engineering and the Prediction of their Mechanical Behavior: A Review, *Materials*, vol. 10, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2017, doi: 10.3390/ma10010050.
- [18] M. Afshar, A. Pourkamali Anaraki, y H. Montazerian, Compressive characteristics of radially graded porosity scaffolds architected with minimal surfaces, *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 92, pp. 254-267, nov. 2018, doi: 10.1016/j.msec.2018.06.051.
- [19] N. Novak *et al.*, Quasi-static and dynamic compressive behaviour of sheet TPMS cellular structure, *Compos. Struct.*, vol. 266, p. 113801, jun. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113801.
- [20] Selective laser melted Ti6Al4V split-P TPMS lattices for bone tissue engineering, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 251, p. 108353, ago. 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108353.
- [21] D. Barba, E. Alabort, y R. C. Reed, Synthetic bone: Design by additive manufacturing, *Acta Biomater.*, vol. 97, pp. 637-656, oct. 2019, doi: 10.1016/j.actbio.2019.07.049.
- [22] Selective laser melted Ti6Al4V split-P TPMS lattices for bone tissue engineering, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 251, p. 108353, ago. 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108353.
- [23] S. M. Ahmadi *et al.*, Additively Manufactured Open-Cell Porous Biomaterials Made from Six Different Space-Filling Unit Cells: The Mechanical and Morphological Properties, *Materials*, vol. 8, n.º 4, pp. 1871-1896, abr. 2015, doi: 10.3390/ma8041871.
- [24] J. Zhu, S. Zou, Y. Mu, J. Wang, y Y. Jin, Additively Manufactured Scaffolds with Optimized Thickness Based on Triply Periodic Minimal Surface, *Materials*, vol. 15, n.º 20, Art. n.º 20, ene. 2022, doi: 10.3390/ma15207084.
- [25] D. W. Abueidha, M. Bakir, R. K. Abu Al-Rub, J. S. Bergström, N. A. Sobh, y I. Jasiuk, Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures, *Mater. Des.*, vol. 122, pp. 255-267, may 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.018.
- [26] N. S. Mustafa *et al.*, «Application of Computational Method in Designing a Unit Cell of Bone Tissue Engineering Scaffold: A Review», *Polymers*, vol. 13, n.º 10, Art. n.º 10, ene. 2021, doi: 10.3390/polym13101584.
- [27] M. S. Dargusch *et al.*, Optimising degradation and mechanical performance of additively manufactured biodegradable Fe–Mn scaffolds using design strategies based on triply periodic minimal surfaces, *Smart Mater. Med.*, vol. 5, n.º 1, pp. 127-139, mar. 2024, doi: 10.1016/j.smaim.2023.10.003.
- [28] S. Ferrandiz, C. M. C. Maldonado, H. De La Rosa, y T. Boronat, Procesos de Extrusión de Material (MATEX/MEX), en *Fabricación Aditiva*, Editorial UNED, 2023, pp. 1-24. Accedido: 18 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pure.ups.edu.ec/en/publications/procesos-de-extrusi%C3%B3n-de-material-matexmex>