

Efecto del espesor de pared, tamaño y tipo de celda unitaria TPMS en la porosidad y tamaño de poro del modelo CAD de estructuras tipo lattice aplicables a la fabricación aditiva por fotopolimerización de scaffolds.

Carlos Andrés Ramírez Rodríguez¹, Carlos Alberto Narváez Tovar², Luis Eduardo Sánchez León³,
Iván Santiago Peña Ortiz⁴, Diego Alexander Garzón Alvarado⁵

¹ Semillero de investigación UNScaffold, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia Email: caaramirezro@unal.edu.co

² Grupo de investigación IPMIM, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia Email: canarvaezt@unal.edu.co

³ Semillero de investigación UNScaffold, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia Email: lesanchezl@unal.edu.co

⁴ Semillero de investigación UNScaffold, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia Email: ipena@unal.edu.co

⁵ Grupo de investigación Laboratorio de Biomiméticos, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia Email: dagarzona@unal.edu.co

Resumen

Este trabajo analiza el efecto del tamaño, espesor y tipo de celdas unitarias TPMS en el tamaño de poro y la porosidad del modelo CAD de estructuras tipo lattice aplicables para la fabricación aditiva de scaffolds mediante procesos de fotopolimerización (MSLA); de forma paralela se analiza la incidencia de factores intrínsecos del proceso de fabricación para la reproducción geométrica de estas estructuras. Dentro de los principales hallazgos se destacan: la calibración del tiempo de exposición de capa, la determinación de espesores de pared y tamaños de característica mínimos que se pueden reproducir, la variación geométrica de las regiones expuestas contra las no expuestas, así como la obtención de mapas de porcentaje de porosidad en función del espesor de pared y el tamaño de la celda para cada TPMS. Se determinó la viabilidad para obtener estructuras TPMS dentro del rango de requerimientos dimensionales y geométricos permisibles para scaffolds.

Palabras clave: Scaffold, TPMS, Celda Unitaria, CAD, MSLA.

Abstract

This work analyzes the effect of the size, thickness and type of TPMS unit cells on the pore size and porosity of the CAD model of lattice-type structures applicable for the additive manufacturing of scaffolds by photopolymerization processes (MSLA); In parallel, the incidence of intrinsic factors of the manufacturing process for the geometric reproduction of these structures is analyzed. Among the main findings, the following stand out: the calibration of the layer exposure time, the determination of wall thickness and the size of minimum features that can be reproduced, the geometric variation of the exposed regions against the unexposed ones, as well as obtaining of percentage porosity maps as a function of wall thickness and cell size for each TPMS. The feasibility to obtain TPMS structures within the range of permissible dimensional and geometric requirements for scaffolds was determined.

Keywords: Scaffold, TPMS, Unit Cell, CAD, MSLA.

1. Introducción

La capacidad del tejido óseo de autorepararse se ve limitada cuando aparecen segmentos defectuosos o lesiones mayores a 10 mm, siendo necesario emplear un injerto óseo [1]. Como una alternativa ante las dificultades intrínsecas de los auto y aloinjertos, la Ingeniería de Tejidos emplea matrices tridimensionales

porosas, llamadas scaffolds, que permiten y estimulan la adherencia y proliferación de células osteoconductoras en sus superficies, además de su diferenciación [2]. La manufactura aditiva, gracias a su capacidad para fabricar piezas complejas mediante la adhesión de material usualmente capa por capa, permite personalizar la geometría externa del scaffold para disminuir la cantidad de tejido retirado del lugar

del defecto y diseñar su estructura interna para lograr la estructura porosa interconectada necesaria para la actividad y reproducción celular [1]. Dentro de las siete familias de procesos de manufactura aditiva, los procesos de fotopolimerización ofrecen ventajas para la fabricación de scaffolds debido a su alta exactitud dimensional y velocidad, nivel de detalle y acabado superficial regular [3,4].

El diseño es un paso importante para la manufactura aditiva de scaffolds debido a la porosidad, tamaño de poro e interconectividad de su estructura interna [1], para lo cual suelen emplearse estructuras celulares tipo lattice con celdas unitarias basadas en barras o en superficies mínimas triplemente periódicas o TPMS [5,6], sin embargo, la optimización del diseño es un problema complejo debido a la amplia variedad de celdas unitarias, porosidades y espesores que pueden emplearse [5]. Además, se debe tener en cuenta que las geometrías empleadas deben cumplir con una adecuada capacidad de fabricación teniendo en cuenta el proceso y todas sus variables y un buen ajuste mecánico con el hueso adyacente [6].

Se ha podido identificar en diversas investigaciones que el tamaño y la forma del poro afectan el rendimiento de la osteointegración encontrando que el tamaño recomendable del poro se encuentra entre las 300 y 600 μm , y el porcentaje de porosidad entre el 90 y 50 %. [5,7].

Este trabajo pretende analizar el efecto del tamaño, espesor y tipo de celda unitaria TPMS en el tamaño de poro y la porosidad del modelo CAD de la estructura tipo lattice, de tal manera que pueda ser aplicable para la fabricación aditiva de scaffolds mediante procesos de fotopolimerización siguiendo un proceso de Diseño para Manufactura Aditiva DfAM.

Dentro de las herramientas para poder analizar la influencia del tamaño de poro y el porcentaje de porosidad se tienen unos mapas de caracterización de las celdas unitarias para este tipo de estructuras TPMS los cuales arrojarán elementos de información valiosa sobre el rango adecuado para la fabricación de los Scaffolds teniendo en cuenta los requerimientos Biomecánicos y el proceso de manufactura aditiva (MSLA /LCD) empleado para su obtención.

Una parte importante del estudio es la determinación de los parámetros adecuados del proceso con los que se pretenden fabricar los scaffolds, ya que si bien los requerimientos Biomecánicos se satisfacen en los modelos CAD de las celdas unitarias analizada, es igualmente importante poder determinar el cumplimiento de estos mismos requerimientos dimensionales y geométricos que se tienen en las estructuras físicas reales obtenidas mediante el proceso de manufactura aditiva por fotopolimerización

(MSLA) que se utilizara para su obtención, ya que idealmente la aplicación práctica de las estructuras analizadas y reproducidas se daría para generar las condiciones adecuadas para que ocurra la adherencia y proliferación de células osteoconductoras en sus superficies.

Mediante el proceso MSLA se fabricaron probetas en las que se evaluaban diferentes dimensiones, geometrías y utilizando como parámetro de variación el tiempo de exposición, se pudo determinar un intervalo adecuado de exposición para las capas que conforman el volumen del sólido, parámetro el cual cabe resaltar es exclusivo para la máquina y resina utilizadas y que no se modificaron a lo largo de este estudio exploratorio.

El proceso de manufactura aditiva MSLA es un proceso en el que se realiza un curado selectivo de una resina líquida fotosensible, mediante el paso de luz filtrada por una pantalla LCD a través de lo que se denomina una máscara de capa; este proceso se repite capa por capa con la respectiva máscara para cada capa permitiendo así construir la geometría que se requiere para la obtención de la pieza tridimensional. A este proceso se le conoce comúnmente como fabricación aditiva en resina.

Debido a que la pieza sólida de polímero curado sale gradualmente de la resina líquida durante el proceso aditivo, esta pieza queda impregnada con la resina líquida circundante, razón por la cual si no se quiere que esta resina no curada se endurezca sobre la pieza fabricada es necesario removerla mediante una operación denominada "Lavado"; para el caso particular se utilizó la máquina "Wash and Cure Plus" de la marca Anycubic, cuya operación consiste en remover la resina no curada excedente de la superficie de las piezas construidas mediante la agitación mecánica de un solvente líquido de la resina Fotocurable, específicamente se utilizó alcohol isopropílico.

Posterior al lavado se procede a secar las piezas para llevarlas a la etapa de "Curado" en donde se exponen las piezas a una fuente de luz con longitud de onda de 405 nm para completar el proceso de fotopolimerización de las piezas y que de esta forma se pueda lograr llegar a las propiedades mecánicas óptimas para las piezas en cuestión; cabe destacar que para el caso particular que se tiene se utilizó para este fin la máquina "Wash and Cure Plus" de la marca Anycubic.

2. Metodología y Métodos

2.1. Pruebas de calibración de tiempo de exposición de capa.

Previo a la caracterización de la celda unitaria se realizó un estudio exploratorio para identificar el tiempo adecuado de exposición de capa para el proceso de manufactura MSLA para la máquina “Anycubic Photon Mono X” (4K) y la resina Fotocurable “Anycubic Clear Resin” sensible a una luz con longitud de onda 405 nm.

En lo que respecta específicamente a los parámetros del proceso de manufactura y debido a la naturaleza fotopolimérica de las resinas utilizadas, se tiene que prestar especial atención a el “tiempo de exposición” el cual hace referencia al intervalo de tiempo en el cual la capa de polímero a agregar es expuesta a una fuente de luz (405 nm) catalizadora de la polimerización la cual solidifica dicha capa expuesta, en este orden de ideas se tiene que ante una exposición adecuada se lograran reproducir de forma correcta las geometrías requeridas con los espesores de pared requeridos y justamente es por esta razón que se destaca la importancia de este parámetro.

Para este estudio se desarrollaron pruebas de diagnóstico comúnmente denominados como test de tortura utilizando una probeta diseñada y recomendada por el fabricante de la máquina, la cual se observa en la Figura 1. Para esta etapa se tuvieron en cuenta las guías de diseño para el proceso MSLA, así como una función exclusiva del fabricante llamada R_E_R_F (Resin Exposición Range Finder) con la cual en un mismo ciclo de construcción se pueden tener 8 regiones con diferentes tiempos de exposición, estas regiones aumentan su tiempo de exposición en intervalos de 0.4 segundos empezando desde el tiempo seleccionado por el usuario (t) hasta llegar a (t+7(0.4s)).

Inicialmente se imprimieron 8 probetas (Figura 2) variando el tiempo de exposición de capa desde 0.6 hasta 3.4 segundos mediante el método R_E_R_F; posteriormente se analizaron dichas probetas por medio de una medición preliminar con un calibrador pie de rey y una inspección visual sobre cada uno de los detalles geométricos obtenidos y se pudo establecer que el mejor comportamiento del proceso correspondía a los tiempos de exposición de 1.2 y 1.6 segundos.

Con la identificación de estos tiempos de exposición preliminares se decidió profundizar en este intervalo, pero esta vez realizando aumentos en el tiempo de exposición de 0.1 segundos empezando desde 1.2 segundos hasta llegar a 1.6 segundos obteniendo 5 nuevas probetas dentro de las cuales se determinó que

el tiempo de exposición óptimo para la resina y máquina utilizadas era de 1.4 segundos.

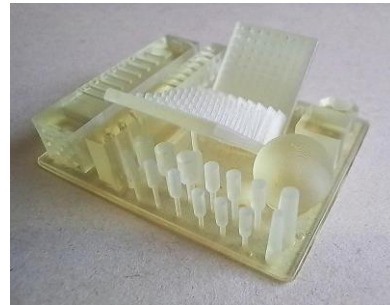


Figura 1. Probeta diseñada por el fabricante de la máquina para la identificación del tiempo de exposición de capa por inspección visual.

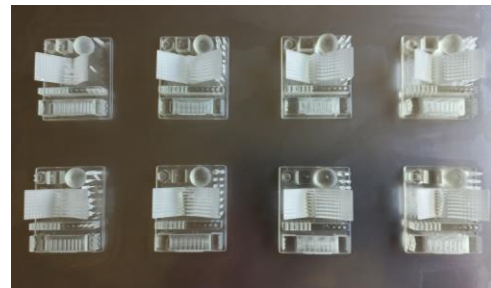


Figura 2. Arreglo de probetas realizadas con diferentes tiempos de exposición (0.6s/1.0s/1.4s/1.8s/2.2s/2.6s/3.0s/3.4s)

2.1.1. Diseño de la probeta para medición y determinación del tiempo de exposición adecuado e identificación del máximo nivel de detalle.

Para tener un mayor control sobre las características geométricas que se quieren comparar y realizar la comprobación del tiempo adecuado de exposición de capa se decide diseñar una probeta basados en el estándar internacional ISO/ASTM 52902. La probeta diseñada se puede observar en la Figura 3.

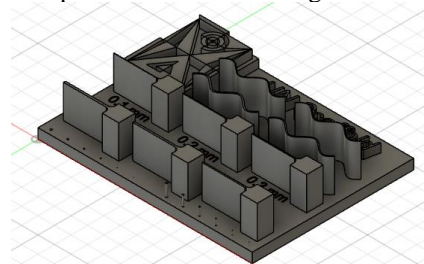


Figura 3. Probeta diseñada por el semillero de investigación UNscaffold para la comparación y evaluación del tiempo de exposición de capa.

En la Figura 4 se pueden observar las regiones geométricas que están siendo objeto de estudio. En la región 1 en la izquierda se observan agujeros que varían desde 0.1 hasta 0.6 mm con aumentos de 0.1 mm, en la zona derecha se encuentran filamentos

delgados de 10 mm de altura que varían su diámetro desde 0.1 hasta 0.6 mm. Con estas características es posible identificar el comportamiento del proceso de manufactura para agujeros y ejes delgados.

La región 2 corresponde a espesores de pared empotrados que varían desde 0.1 hasta 0.6 mm con aumento de 0.1 mm y una altura de 10 mm. La geometría 3 corresponde a una zona que permite observar el comportamiento del proceso de fabricación cuando existen regiones expuestas y no expuestas al paso de luz, la región 4 corresponde a espesores de pared con una curvatura, esta geometría es cercana a la que presentan las estructuras TPMS, el objetivo de esta zona es establecer una metodología de medición con el equipo “Alicona InfiniteFocus G5 Plus”.

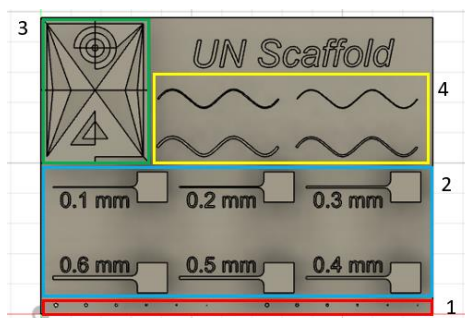


Figura 4. Regiones de estudio para la comparación y evaluación del tiempo de exposición de capa.

Definida la probeta se realizó una primera construcción utilizando un tiempo de exposición de 1,4 S, las mediciones se hicieron con el microscopio “Alicona InfiniteFocus G5 Plus” disponible en el laboratorio de metrología dimensional de precisión de la Universidad Nacional de Colombia, este microscopio nos permite medir hasta en un orden de magnitud de nanómetros, utilizando esta herramienta pudimos medir con bastante aproximación cada uno de los detalles geométricos a evaluar.

2.2. Caracterización de la celda unitaria.

Para la caracterización de la celda unitaria se eligieron tres estructuras TPMS, Giroide, Split-P y Diamante, las cuales fueron modeladas implícitamente empleando el software nTopology®, variando su tamaño de celda entre 1 y 3 mm y su espesor de pared entre 0,3 y 0,6 mm. Los modelos CAD implícitos fueron convertidos a volúmenes representativos y exportados con el fin de poder medir su tamaño de poro en Autodesk FUSION 360®, mientras que el cálculo de la porosidad fue realizado directamente en nTopology®.

2.2.1. Medición del tamaño de poro.

Para la medición del tamaño de poro se tuvo en cuenta que cada una de las celdas unitarias TPMS tienen

geometrías distintas que hacen que la forma del poro y la interconectividad de los mismos sea distinta. En la figura 5 se puede observar la configuración geométrica de la estructura Giroide, se aprecia que por su distribución el tamaño de poro se forma entre las dos paredes onduladas, por esta razón el tamaño de poro se midió como se indica en la Figura 6.

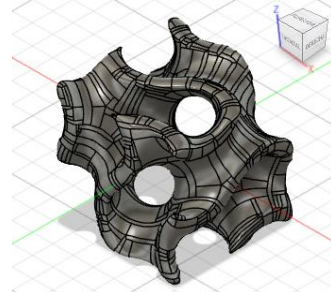


Figura 5. Celda unitaria Giroide con tamaño de 3 mm y espesor de pared de 0.5 mm en vista isométrica.

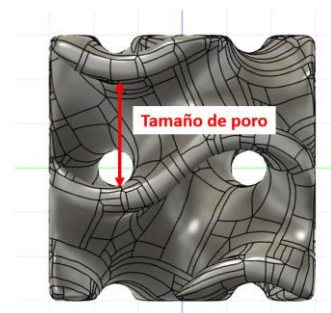


Figura 6. Medición del tamaño de poro en el CAD para una celda unitaria Giroide con tamaño de 3 mm y espesor de pared de 0.5 mm en vista frontal.

Para la estructura de diamante la configuración cambia, la distribución de los poros se puede ver en la vista isométrica frontal como también en la vista lateral como se muestra en las Figuras 7 y 8 respectivamente. La medición del tamaño de poro para esta configuración se realizó como se muestra en la Figura 8.

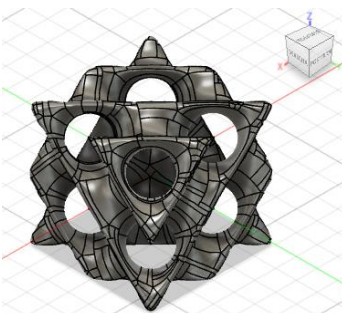


Figura 7. Celda unitaria Diamante con tamaño de 3 mm y espesor de pared de 0.3 mm en vista isométrica frontal.

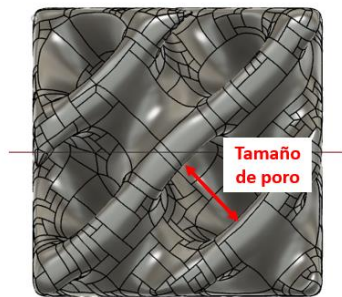


Figura 8. Medición del tamaño de poro en la vista lateral para la celda unitaria Diamante.

La estructura Split P por su configuración presenta los poros en las caras perpendiculares como se muestra en la Figura 9, por esta razón la medición se hace directamente sobre cualquiera de las vistas (Figura 10).

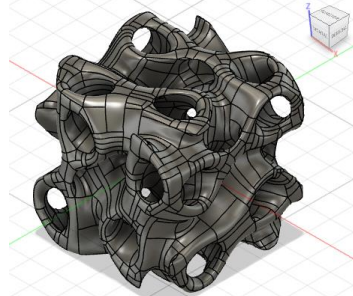


Figura 9. Celda unitaria SplitP con tamaño de 3 mm y espesor de pared de 0.3 mm en vista isométrica.

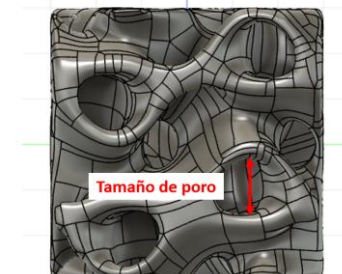


Figura 10. Medición del tamaño de poro celda unitaria SplitP.

2.3. Resultados

2.3.1 Medición de la región 2 de la probeta diseñada. Espesor de pared delgada.

A partir de las mediciones realizadas en la región 2 de la probeta mostrada en la Figura 4 fabricada con un tiempo de exposición de 1.4 segundos se busca evaluar el comportamiento del proceso de manufactura en la conformación de paredes delgadas, los espesores van desde 0.1 a 0.6 mm de espesor con aumentos de 0.1 mm.

Como resultado principal de la fabricación de esta probeta con un tiempo de exposición de 1.4 segundos,

se obtuvo que la pared de 0.1 mm resultaba demasiado delgada para poderse conformar de forma adecuada (Figura 11); en teoría la resolución en el plano XY que la máquina está en capacidad de reproducir es de 0.05 mm (la mitad del espesor de la pared de 0.1 mm) sin embargo hay otros factores involucrados en el conformado de las piezas que pueden afectar circunstancialmente la construcción de una pared delgada de estas características, como por ejemplo el curado, la fuerza de agitación producida por la máquina wash and cure, la orientación de construcción de la probeta y la no inclusión de soportes.

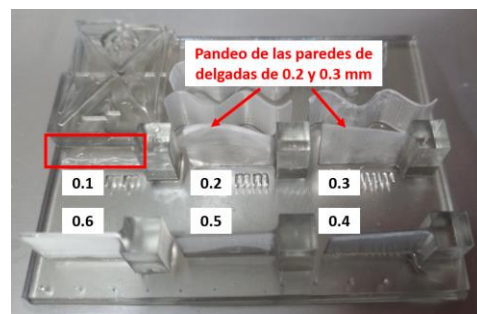


Figura 11. Probeta diseñada por el semillero UNscaffold para la comparación y evaluación del tiempo de exposición de capa una vez fabricada.

Las paredes delgadas con espesores de 0.2 y 0.3 mm sufrieron una deformación que puede notarse a simple vista, estas pudieron darse durante el proceso de construcción, el proceso de lavado o incluso el proceso de curado. Una vez se termina de construir la pieza su estado es una probeta en verde que no ha terminado de alcanzar su resistencia máxima, esta se alcanza cuando se cura ya que se completa la fase de polimerización entre capas, por esta razón la acción de la fuerza de agitación en el lavado, la contracción volumétrica de la pieza o incluso el movimiento para desprender la misma de la placa de soporte pudieron causar la deformación como se observa en la Figura 11. Los espesores de 0.4, 0.5 y 0.6 mm también sufrieron desviaciones, pero no son significativas.

En la Figura 12 se puede observar la medición del espesor de pared delgada de 0.3 mm. Inicialmente se tomó la medida a través de un plano de corte orientado perpendicularmente a la dirección longitudinal de la pared y en una zona de nula desviación. El valor obtenido con esta medición fue de 353.62 μm . Para obtener un valor más preciso y disminuir el error producto de la selección adecuada de los puntos se realizó una medición utilizando 100 planos de corte como se muestra en la Figura 13, el promedio de este valor nos dio una medición de 349.32 μm .

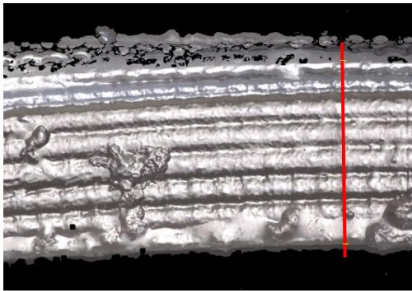


Figura 12. Mediciones de espesor de pared delgada 300 μm utilizando un plano de corte. Pieza fabricada con un tiempo de exposición de 1,4 s.

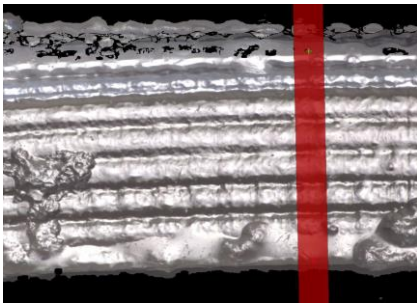


Figura 13. Mediciones de espesor de pared delgada 300 μm utilizando 100 planos de corte. Pieza fabricada con un tiempo de exposición de 1,4 s.

Realizando una comparación de los valores obtenidos con los valores nominales del modelo CAD podemos establecer que la desviación del espesor de pared está en el orden de las 50 μm , un error del 16 %. La desviación presentada en la pared delgada pudo provocar la obtención de un error relativamente alto.



Figura 14. Mediciones de espesor de pared delgada 500 μm utilizando 1000 planos de corte. Pieza fabricada con un tiempo de exposición de 1,4 s.

En la Figura 14 se muestra la medición realizada para el espesor de pared de 0.5 mm utilizando el mismo procedimiento mencionado anteriormente, esta vez se utilizó 1000 planos de corte ya que esta sección está mucho más recta y no presenta desviaciones como el espesor de 0.3 mm. El valor obtenido de esta medición es de 505.71 μm , un error aproximado del 1%. Esta medición es mucho más precisa, lo que nos refuerza la hipótesis sobre la selección del tiempo de exposición de capa adecuado.

2.3.2 Medición de la región 3 de la probeta diseñada. Regiones expuestas y no expuestas al paso de luz.

La figura 15 muestra la región 3 de forma detallada y con los valores nominales del diseño CAD. El diámetro más externo tiene un valor nominal de 7 mm, respectivamente las circunferencias internas son de 5, 3 y 1 mm. Esta imagen sirve como referencia para realizar el análisis de la medición de las zonas expuestas y no expuestas.

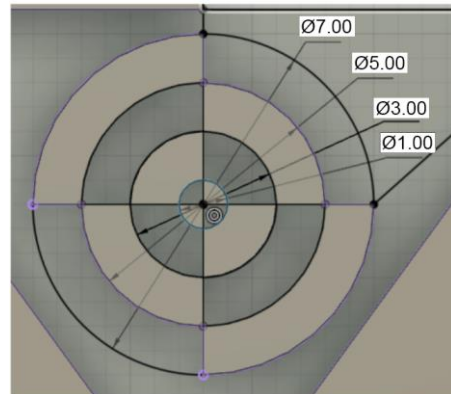


Figura 15. Valor nominal para las regiones expuestas y no expuestas a la luz.



Figura 16. Medición de los diámetros externos teniendo como referencia el contorno de las regiones expuestas mediante las máscaras de capa.

En la Figura 16 se observa la medición que se realizó sobre los diámetros externos de la probeta fabricada teniendo en cuenta el contorno expuesto a la luz, la medición se realizó utilizando una aproximación de puntos sobre la circunferencia del contorno. La sección gris corresponde a las regiones expuestas a la luz mediante el paso de esta a través de las máscaras de capa, en contraste las secciones negras corresponden a las regiones no expuestas u ocultas por la máscara de capa. La circunferencia verde que se muestra corresponde a la circunferencia que crea el programa de medición al seleccionar n puntos del contorno circular que se desea medir, si se observa con más

detalle se puede apreciar que el centro de dicha circunferencia aproximada coincide con la circunferencia del artefacto en cuestión.

En la tabla 1 se pueden apreciar los resultados obtenidos de la medición de los diámetros externos, se pudo evidenciar que el proceso de manufactura y en especial la máquina Anycubic Photon Mono X con el tiempo de exposición óptimo tiene una alta precisión ya que la mayor desviación presentada corresponde a 0.056 mm, es decir 56 μm . Se pudo notar que para todos los diámetros externos de las regiones expuestas la desviación es negativa, es decir todas las medidas fueron menores que el valor nominal.

Tabla 1. Resultados obtenidos de la medición de los diámetros externos.

Diámetro exterior			
Medida Nominal [mm]	Diámetro medido [mm]	Error relativo [%]	Desviación nominal [mm]
7.00	6.96904	-0.44229	0.03096
	6.95216	-0.68343	0.04784
	6.94380	-0.80286	0.0562
5.00	4.98668	-0.26640	0.01332
	4.98018	-0.39640	0.01982
	4.98102	-0.37960	0.01898
3.00	3.01712	0.570667	0.01712
	3.00590	0.196667	0.0059
	3.01466	0.488667	0.01466
1.00	1.02060	2.06	0.0206
	1.02122	2.122	0.02122
	1.02688	2.688	0.02688

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 17 se observa la medición que se realizó sobre los diámetros internos, es decir, la medición se realizó teniendo como referencia el contorno de la región negra. Se puede observar que el diámetro es más pequeño y aparentemente la desviación es mayor; esta hipótesis se confirma con los resultados obtenidos ya que la desviación mayor corresponde a un valor de 0.30

mm, es decir 300 μm . A pesar de esto consideramos que el proceso de manufactura para un tiempo de exposición de capa de 1,4 s entrega un gran nivel de detalle y precisión.



Figura 17. Medición de los diámetros internos teniendo como referencia el contorno no expuesto.

Tabla 2. Resultados obtenidos de la medición de los diámetros internos.

Diámetro interior			
Medida Nominal [mm]	Diámetro medido [mm]	Error relativo [%]	Desviación nominal [mm]
7.00	6.71524	-4.06800	0.28476
	6.69542	-4.35114	0.30458
	6.75122	-3.55400	0.24878
5.00	4.82376	-3.52480	0.17624
	4.81756	-3.64880	0.18244
	4.81828	-3.63440	0.18172
3.00	2.82516	-5.828000	0.17484
	2.83720	-5.426667	0.1628
	2.83190	-5.603333	0.1681
1.00	0.83592	-16.40800	0.16408
	0.83466	-16.53400	0.16534
	0.83068	-16.93200	0.16932

Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Caracterización de celda unitaria y medición de la porosidad y tamaño de poro en el modelo CAD.

Con la caracterización de la celda unitaria y la identificación del tiempo de exposición de capa óptimo se pudo acotar el espacio de diseño para la fabricación de los scaffolds mediante el proceso MSLA, pues se pudieron identificar los valores del tamaño de celda unitaria y el espesor de pared que permiten alcanzar los tamaños de poro y porosidad adecuados para cada una de las geometrías TPMS Giroide, Diamante y Split-P estudiadas.

En las Figuras 18, 19 y 20 se muestran los mapas calculados para la identificación del porcentaje de porosidad en función del espesor de pared y tamaño de celda unitaria para las geometrías Giroide, Diamante y SplitP. Cada una de estas gráficas contienen una zona acotada por dos líneas discontinuas, esta región corresponde al porcentaje de porosidad recomendable para la fabricación de scaffolds que está comprendido entre el 50 y el 90 %.

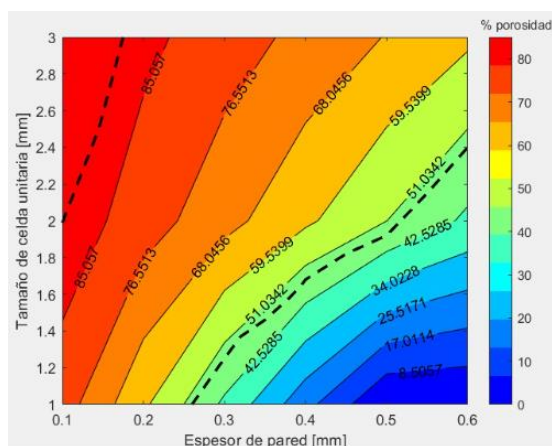


Figura 18. Mapa calculado del porcentaje de porosidad en función del espesor de pared y el tamaño de la celda unitaria para la geometría Giroide.

Para el Giroide se puede observar que para tamaños de celda unitaria menores a 2 mm es recomendable usar espesores de pared menores a 0.25 mm. Para tamaños de celda mayores a 2 mm se pueden emplear espesores de pared de hasta 0.5 mm. Con estas combinaciones de variables es posible cumplir la condición para un porcentaje de porosidad adecuado.

Cuando el porcentaje de porosidad es menor que el 50 % la fracción sólida es considerable, impidiendo así la formación de poros o lo que se conoce como cavidades de vascularización en el tejido óseo. Esta condición podría ser negativa si el tamaño del poro se reduce.

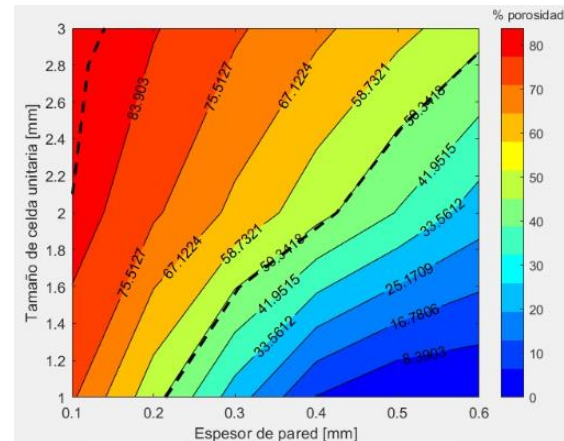


Figura 19. Mapa calculado del porcentaje de porosidad en función del espesor de pared y el tamaño de la celda unitaria para la geometría Diamante.

Para la geometría Diamante se puede observar que para tamaños de celda unitaria menores a 2.1 mm se deben usar espesores de pared menores a 0.2 mm. Para tamaños de celda mayores a 2 mm se pueden emplear espesores de pared de hasta 0.45 mm.

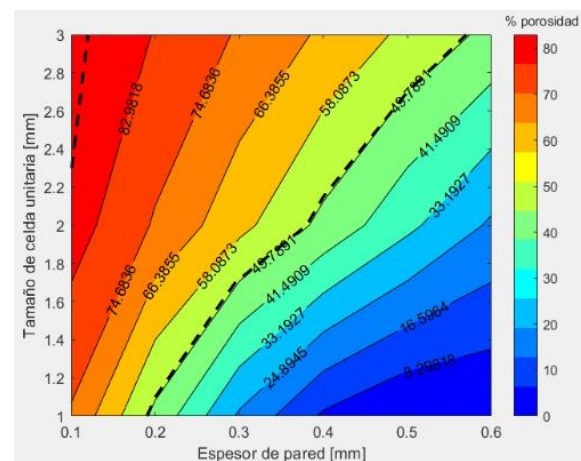


Figura 20. Mapa calculado del porcentaje de porosidad en función del espesor de pared y el tamaño de la celda unitaria para la geometría SplitP.

En la Figura 20 se puede observar que para tamaños de celda unitaria SplitP menores a 2.3 mm se deben usar espesores de pared menores a 0.2 mm. Para tamaños de celda mayores a 2 mm se pueden emplear espesores de pared de hasta 0.35 mm.

Comparando las tres geometrías se puede concluir que el Giroide presenta una mayor región de factibilidad para la construcción de scaffolds teniendo en cuenta la variable del porcentaje de porosidad, esto quiere decir que para el Giroide existe una mayor cantidad de combinaciones de tamaños de celda unitaria y espesores de pared que cumplen la condición recomendada. La estructura con una menor región factible es el SplitP, se puede apreciar que esta región es menor respecto a las otras dos geometrías.

En los mapas mostrados en las Figuras 21, 22 y 23 se muestran los mapas calculados para la identificación del tamaño de poro en función del espesor de pared y tamaño de celda unitaria para las geometrías estudiadas. Cada una de estas gráficas está delimitada por la región donde se encuentran los valores del tamaño de poros recomendable para la fabricación de scaffolds que está comprendida entre las 300 y 600 μm .

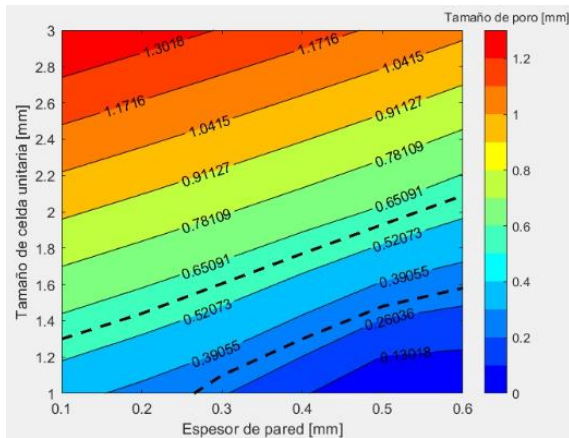


Figura 21. Mapa calculado del tamaño de poro en función del espesor de pared y el tamaño de la celda unitaria para la geometría Giroide.

La región de tamaño de poro adecuada surge de la evaluación de dos procesos biológicos principales que se comportan de manera distinta, se trata de la vascularización y colonización celular. Para la propagación y diferenciación celular es necesario que a las células se les suministren los nutrientes y la energía necesaria para desarrollar los distintos procesos metabólicos, esto es posible gracias a la presencia de los vasos sanguíneos dentro de las cavidades vasculares o poros. Cuando el tamaño de poro se reduce no es posible la formación de estas cavidades vasculares y por ende la formación de vasos sanguíneos, por esta razón es importante que se formen poros de por lo menos 300 μm . Para la colonización celular ocurre el caso contrario, pues un tamaño de poro reducido permite una colonización más rápida. Se ha podido establecer que un tamaño de poro de máximo 600 μm favorece este proceso [5].

En la Figura 21 se puede observar que para el Giroide valores de celda unitaria mayores a 2 mm no son recomendables para la fabricación de scaffolds, pues por encima de estos valores el proceso de colonización celular no sería adecuado y finalmente no se formaría el tejido.

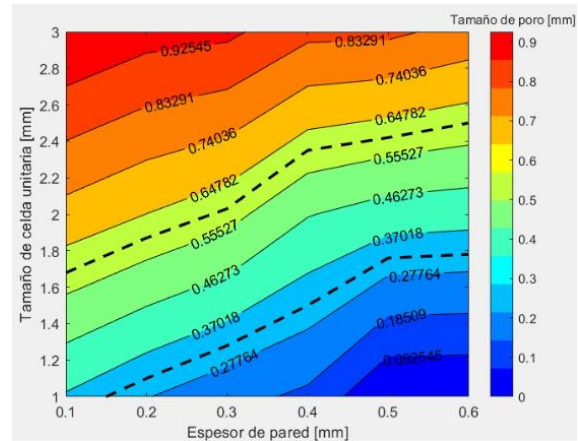


Figura 22. Mapa calculado del tamaño de poro en función del espesor de pared y el tamaño de la celda unitaria para la geometría Diamante.

Para la geometría del diamante el valor límite para la celda unitaria se encuentra en 2.4 mm, valores por encima de este valor el tamaño de poro es superior a las 650 μm . Valores inferiores a 1.5 mm tampoco son recomendables pues el tamaño de poro está por debajo de las 300 μm y el proceso de vascularización se vería afectado porque no se generan las cavidades para alojar los vasos sanguíneos.

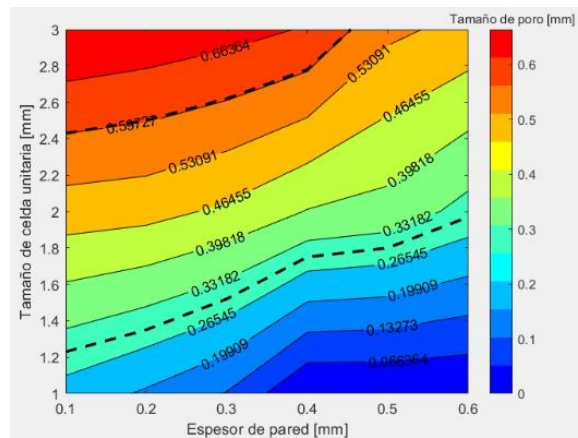


Figura 23. Mapa calculado del tamaño de poro en función del espesor de pared y el tamaño de la celda unitaria para la geometría SplitP.

Caso contrario al porcentaje de porosidad, el SplitP es la geometría que mayor región factible presenta para el tamaño de poro respecto a las otras dos geometrías. El Giroide es la estructura que menor región factible presenta.

2.4. Conclusiones

Respecto a las consideraciones implícitas del proceso de manufactura y su relación con los requerimientos Biomecánicos se puede concluir que es viable la realización de Scaffolds mediante el proceso MSLA y que a su vez se satisfacen dichos requerimientos dentro de los cuales están los tamaños de poro promedio y

espesores adecuados a fin de generar las condiciones adecuadas para que ocurra la adherencia y proliferación de células osteoconductoras en sus superficies.

Se evidenció un comportamiento característico del proceso MSLA en donde se obtuvieron excelentes aproximaciones dimensionales en comparación con las dimensiones nominales del modelo CAD, esto último sobre todo para las regiones expuestas o a las que se agrega material en contraste con las regiones no expuestas u ocultas por las máscaras de capa, las cuales pueden considerarse como agujeros o regiones vacías.

El Giroide presenta una mayor región de factibilidad para la construcción de scaffolds teniendo en cuenta la variable del porcentaje de porosidad, esto quiere decir que para el Giroide existe una mayor cantidad de combinaciones de tamaños de celda unitaria y espesores de pared que cumplen la condición recomendada. La estructura con una menor región factible para este análisis es el SplitP, se puede apreciar que esta región es menor respecto a las otras dos geometrías.

Para el tamaño de poro es el caso contrario, ya que la geometría que permite una mayor cantidad de combinaciones que satisfacen el requerimiento es la geometría SplitP mientras que el Giroide es el que menor margen o región acota. Sin embargo, es necesario revisar más a fondo la influencia de las geometrías y vértices agudos que se forman en el interior de las cavidades presentes en este patrón particular con respecto al comportamiento biológico celular.

La variación del tamaño de la celda unitaria y el espesor de pared tienen un efecto considerable sobre las características estudiadas por lo que es necesaria una adecuada combinación entre estas dos variables para aumentar la factibilidad en la proliferación de células óseas en estas estructuras TPMS.

3. Referencias

[1] Y. Yang, G. Wang, H. Liang, C. Gao, S. Peng, L. Shen, C. Shuai. “Additive manufacturing of bone scaffolds”. *Int J Bioprint*, vol. 5, n.º 1: 148, 2019. [PDF] Disponible en: <https://ijb.whioce.com/index.php/int-j-bioprinting/article/viewFile/148/130>

[2] T. Ghassemi, A. Shahroodi, M. H. Ebrahimzadeh, A. Mousavian, J. Movaffagh, A. Moradi. “Current Concepts in Scaffolding for Bone Tissue Engineering”. *Arch Bone Jt Surg*, vol. 6, n.º 2, pp. 90-99, 2018. [PDF] Disponible en: https://abjs.mums.ac.ir/article_10271_2adffd236a8444a2a5f9ed456293ea4b.pdf

[3] H. Qu. “Additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds”. *Materials Today Communications*, vol. 24, 101024, 2020. [en línea] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492820305456?via%3Dihub>

[4] K. Kim, A. Yeatts, D. Dean, J. P. Fisher. “Stereolithographic Bone Scaffold Design Parameters: Osteogenic Differentiation and Signal Expression”. *Tissue Engineering Part B: Reviews* vol. 16, n.º 5, pp. 523-539, 2010. [en línea] Disponible en: <https://www.liebertpub.com/doi/epub/10.1089/ten.teb.2010.0171>

[5] D. Barba, E. Alabort, R.C. Reed. “Synthetic bone: Design by additive manufacturing”. *Acta BioMaterialia*, vol. 97, pp. 637-656, 2019. [en línea] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706119305380>

[6] S. Blanquer, D.W. Grijpma. “Triply periodic minimal surfaces (TPMS) for the generation of porous architectures using stereolithography”. En: A. Rainer, L. Moroni. “Computer-Aided Tissue Engineering Methods and Protocols”, pp. 19-30. Humana, New York, 2021. [en línea] Disponible en: https://link.springer.com/protocol/10.1007/978-1-0716-0611-7_2

[7] V. Karageorgiou, D. Kaplan. “Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis”. *Biomaterials*, vol. 26, n.º 27, pp. 5474-5491, 2005. [en línea] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961205001511>