



Caracterización de la permeabilidad de andamios porosos de ácido poliláctico fabricados con impresoras 3D comerciales

Characterization of the permeability of porous polylactic acid scaffolds fabricated with commercial 3D printers

Alejandro González-González^I, Roxana Lugo-Hernández^I, Patricia del Carmen Zambrano-Robledo^{II}, Marcelino Rivas-Santana^I, Ricardo del Risco-Alfonso^{III}, Roberto Pérez-Rodríguez^{IV,*}

I. Universidad de Matanzas, Centro de Estudios de Manufactura Avanzada y Sostenible, CEFAS. Matanzas. Cuba.

II. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.

III. Universidad de Camagüey, Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas, CEEFREP. Camagüey. Cuba.

IV. Universidad de Holguín. Centro de Estudios CAD/CAM. Holguín. Cuba.

* Autor de correspondencia: roberto.perez.cu@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 8 de diciembre de 2022

Aceptado: 15 de febrero de 2023

Resumen

En este trabajo se caracterizó la propiedad de permeabilidad de andamios porosos, fabricados de ácido poliláctico mediante impresión 3D usando el método de deposición fundida, a partir de la modelación matemático-estadística de la relación entre porosidad y permeabilidad. Los andamios se diseñaron con morfología interna de superficies minimales triplemente periódicas de los tipos Diamante, Giroide y Primitiva de Schwarz con tres niveles de porosidad: 50, 60 y 70 %. La fabricación se llevó a cabo en la impresora comercial Wanhao 6D. La medición de la permeabilidad se

realizó en una instalación experimental que cumple con la ley de Darcy. Los resultados para cada estructura se ajustan a un polinomio cuadrático con un coeficiente de correlación superior al 98 % para todos los casos. Las pruebas de normalidad y homocedasticidad indican la pertinencia de los modelos.

Palabras claves: andamios porosos; superficie mínima triplemente periódica; permeabilidad; porosidad; impresión 3D.

Abstract

In this work, the permeability property of porous scaffolds, made of polylactic acid by 3D printing using the fused deposition method (FDM), is characterized from the mathematical-statistical modeling of the relationship between porosity and permeability. The scaffolds were designed with internal morphology of triply periodic minimal surfaces of the Schwarz Diamond, Gyroid and Primitive types with three levels of porosity: 50, 60 and 70 %. Manufacturing was carried out on the commercial Wanhao 6D printer. The

permeability measurement was performed in an experimental setup that complies with Darcy's law. The results for each structure fit a quadratic polynomial with a correlation coefficient greater than 98% for all cases. The normality and homoscedasticity tests indicate the relevance of the models.

Key words: porous scaffolds; triply periodic minimal surface; permeability; porosity; 3D printing.

Cómo citar este artículo:

González González A, Lugo Hernández R, Zambrano Robledo PC, Rivas Santana M, del Risco Alfonso R, Pérez Rodríguez R. Caracterización de la permeabilidad de andamios porosos de ácido poliláctico fabricados con impresoras 3D comerciales. Ingeniería Mecánica. 2023;26(2):e669. ISSN 1815-5944.

1. Introducción

En la ingeniería de tejido, los andamios porosos para reemplazar la estructura ósea juegan un papel fundamental, siendo una de las propiedades más importantes la permeabilidad, ya que brinda la información cuantitativa de la capacidad de desplazamiento de un fluido a través de su estructura. Esta depende de la combinación de porosidad, tamaño de los poros, orientación, tortuosidad e interconectividad [1]. La permeabilidad permite describir cuantitativamente el estado de crecimiento del tejido y su capacidad para difundir nutrientes y oxígeno a través de los poros de los andamios [2]. Parámetros como la circulación de materiales extracelulares, el

suministro de nutrientes y el contacto entre células adyacentes, entre otras, están directamente relacionadas con la interconectividad y la permeabilidad del andamio [2, 3]. Por lo tanto, la precisa determinación de la permeabilidad es crucial en el proceso de diseño de los sustitutos para implantes óseos [4]. Valores altos de permeabilidad proporcionan condiciones más deseadas para la formación del hueso *in vivo*, mientras que valores inadecuados pueden conducir a la formación de tejidos cartilaginosos, en lugar de óseos [5].

Durante la fabricación aditiva de andamios porosos con morfología interna de Superficies Minimales Triplemente Periódicas [SMTP] de PLA, se pueden obtener altos valores de permeabilidad según los resultados mostrados en investigaciones recientes [6]. El interés por las SMTP viene dado porque la estructura del hueso trabecular presenta una curvatura promedio casi nula, que es una propiedad distintiva de las SMTP [7, 8]. Entre las superficies más estudiadas se encuentran la Giroide (G), la Primitiva de Schwarz (P) y la diamante (D). De forma general, las SMTP exhiben las mejores propiedades requeridas en aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, las estructuras P y G muestran la mayor resistencia a la compresión y alta permeabilidad respectivamente, si lo comparamos con las estructuras con simetría cúbica para los mismos valores de tamaño de poros y porosidad [9]. Para la fabricación de estructuras SMTP con impresión 3D ha sido muy utilizado el ácido poli-láctico (PLA), ya que es biocompatible, biodegradable [10], presenta buenas propiedades mecánicas y se logra imprimir con facilidad [11, 12]. También se han logrado imprimir en Ti6Al4V [13].

Los estudios de permeabilidad presentados en la literatura utilizan la ecuación de Darcy [14] y de Kozeny-Carman [4] y también aparecen reportes de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional [CFD] implementada por elementos finitos [15, 16]. Algunos de los trabajos reportados muestran el estudio realizado para andamios fabricados de polítrimetileno-carbonato (PTMC) [9], de PCL y de PLA [14]. También se ha estudiado la permeabilidad en la dirección radial y su relación con los resultados obtenidos en la dirección longitudinal [17]. Otros estudios comparan los resultados experimentales de permeabilidad con simulaciones computacionales [4] y extraen variadas conclusiones acerca del comportamiento de los flujos de fluidos, la anisotropía espacial de la permeabilidad o la dependencia de los resultados de la viscosidad del fluido [18]. Los andamios son fabricados de una variedad de materiales y por diferentes métodos como la deposición fundida, la lixiviación y la sinterización selectiva por láser [19]. Los trabajos presentados en [20] hacen un análisis de la permeabilidad *versus* el diseño en andamios con estructura TPMS. Los resultados arrojaron que el andamio de superficie G es más permeable comparado con la estructura P de Schwartz, siendo esta estructura un buen candidato para ser utilizada en la ingeniería de tejido.

El crecimiento exponencial de la impresión 3D con fines médicos y la posibilidad de contar con un *stock* de impresoras de diferentes calidades y costos, permite llevar esta tecnología a escala industrial, incluso doméstica. Para ello, se hace necesario realizar la evaluación de la obtención de andamios porosos para fines médicos con impresoras comerciales, con el objetivo de apreciar si se garantiza la interconectividad necesaria. Por tal motivo, el presente trabajo realiza una caracterización de la permeabilidad de andamios porosos de ácido poli-láctico fabricados mediante impresión 3D con estructuras del tipo TPMS (tipo G, P y D) con porosidades de 50, 60 y 70 % con el uso de una impresora comercial. Para la determinación de la permeabilidad se diseñó una instalación experimental que cumple con la ley de Darcy.

2. Métodos y Materiales

Diseño de los andamios

Para el diseño de los andamios se utilizó el software CAS (*Computer Algebra System*) de Wolfram Mathematica versión 11.2. Las ecuaciones paramétricas utilizadas se obtienen a partir de aproximaciones nodales al desarrollo en serie de Fourier de las superficies minimales. Los términos principales de las series para cada una de las superficies utilizadas dan funciones implícitas en las tres variables espaciales ecuaciones (1), (2) y (3).

$$\text{Estructura P: } \cos(X) + \cos(Y) + \cos(Z) + CP = 0 \quad (1)$$

$$\text{Estructura G: } \cos(X) \sin(Y) + \cos(Y) \sin(Z) + \cos(Z) \sin(X) + CG = 0 \quad (2)$$

$$\text{Estructura D: } \cos(X) \cos(Y) \cos(Z) - \sin(X) \sin(Y) \sin(Z) + CD = 0 \quad (3)$$

Dónde: $(X, Y, Z) = (n_x \pi x, n_y \pi y, n_z \pi z)$ y cada n_i permite controlar la periodicidad (tamaño de la celda unitaria) en cada dirección espacial, que en este trabajo fue de 2,11 mm.

Los valores de las constantes CP , CG y CD se ajustaron según las porosidades estudiadas: 50, 60 y 70 %.

Los andamios se diseñaron en forma de cilindros con una parte exterior rellena al 100 % y con una parte interior que varía su estructura de acuerdo a la geometría de las estructuras P, G y D seleccionadas para la investigación. El diámetro exterior fue de 18 mm, el diámetro intermedio de 12,5 mm y la altura de 12,66 mm, figura 1.

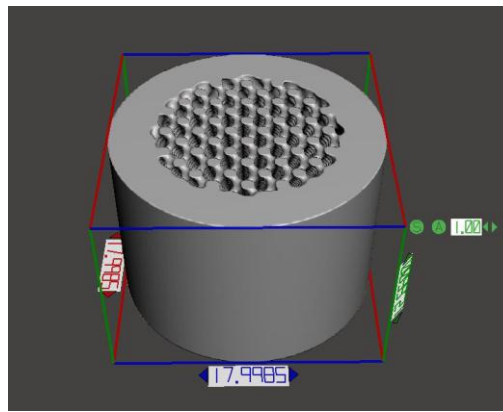


Fig. 1. Geometría de los andamios. Fuente: autores

Determinación de la porosidad

Para la determinación de la porosidad (ϕ_{Exp}), se utilizó el software Meshmixer para determinar el volumen de sólido (V_{Sol}) y poder realizar la corrección de la misma.

Equipamiento utilizado

Se utilizó una impresora 3D doméstica de escritorio modelo WANHAO Duplicator 6 con el software libre Cura versión 4.12.1., que utiliza el método de impresión FDM, con un sistema de extrusión MK11. Posee nivelación automática, nivelación manual de la cama, área máxima imprimible de $200 \times 200 \times 180$ mm, diámetro del filamento de 1,75 mm, velocidad máxima de impresión de 70 mm/s, exactitud en los ejes: X 0,0125 mm, Y 0,0125 mm y Z 0,005 mm, figura 2.



Fig. 2. Impresora WANHAO Duplicator 6. Fuente: autores

Parámetros de impresión

Para establecer los parámetros de impresión se realizaron pruebas preliminares hasta lograr la menor discrepancia entre las dimensiones de las probetas diseñadas y las fabricadas. Se obtuvieron los siguientes resultados: altura de capa: 0,1 mm, espesor de pared: 0,8 mm, espesor de la capa superior e inferior: 0,6 mm, densidad de impresión: 20 mm/s, temperatura de impresión: 210 °C, temperatura de la mesa: 60 °C, plataforma de adhesión: Raft, diámetro de la boquilla: 0,2 mm, velocidad de retracción: 40 mm/s, distancia de retracción: 7 mm, espesor inicial de capa: 0,15 mm, ancho inicial: 100 %, velocidad de la capa superior: 15 mm/s, y velocidad de relleno: 15 mm/s.

Material utilizado para la fabricación de los andamios e instalación experimental para medir la permeabilidad

Como material para la fabricación de los andamios se utilizó el PLA puro fabricado por Smartfill de diámetro 1,75 mm con una densidad de 1,25 g/cm³.

El porta-andamio, figura 3, está compuesto de una pieza escalonada interiormente donde se introduce el andamio, luego se coloca encima una junta de material impermeable y se cierra con una tapa que posee una guía, todo ello ajustado con tornillos M4. Para la fabricación del porta-andamio se utilizó el aluminio fundido, con un maquinado interior de la cavidad donde se deposita el andamio poroso. Luego, a la tapa se le conecta un

conducto con una válvula reguladora de flujo que se une al depósito de 20 l de agua. La altura del depósito con respecto al porta-andamio es de 800 mm. Para medir el tiempo de filtraje del andamio y la cantidad de líquido filtrado, se utilizó un cronómetro y un beaker graduado de más de 500 ml.



Fig. 3. Instalación experimental para determinar la permeabilidad de andamios porosos. Fuente: autores

Método de cálculo de la permeabilidad

La permeabilidad de los andamios se determinó con la ecuación de Darcy [21] mediante una instalación experimental, figura 3. El andamio se fija en el porta-andamio y se abre la válvula hasta que pasen 500 mL de agua por su interior, determinándose el tiempo necesario para recorrer la longitud del andamio. Posteriormente se calcula el caudal Q (m^3/s) manteniendo constante el nivel de líquido en el tanque. Las mediciones se repiten tres veces para cada andamio, con tres andamios por cada tipo de estructura y porosidad. El valor de la permeabilidad (k) se determinó por la ecuación de Darcy, ecuación (4):

$$k = -\mu Q L A \Delta p \quad (4)$$

En la ecuación anterior, μ (Pa.s) es la viscosidad del agua, A (m^2) es el área de la sección transversal del andamio, L (m) representa la longitud del andamio y Δp (Pa) es la caída de presión del fluido que es equivalente a la presión hidrostática en la parte superior del andamio:

$$\Delta p = \rho g h \quad (5)$$

Donde ρ (m^3/kg) es la densidad del agua, g (m/s^2) es el valor de la aceleración de la gravedad y h (m) es la altura de la tubería.

Estudio de la morfología

Las pruebas de microscopía electrónica (SEM) se realizaron en un microscopio Zeiss Sigma 300 VP. La superficie de la muestra se recubre previamente con una fina capa de oro (Au), utilizando una corriente de pulverización catódica de 25 mA durante 30 s a 9 mbar de presión de la cámara. Las medidas se tomaron con un aumento de 15x utilizando una señal de electrones secundarios a una distancia de trabajo de 40 mm. Durante el estudio se realizó la μTC de la muestra de estructura Gyroide con 60 % de porosidad, las dimensiones del andamio fueron $20 \times 10 \times 10$ mm y el equipo utilizado fue un GE CT Scanner Phoenix v|tome|x m. Los datos de rayos X fueron tomados a diferentes ángulos usando un voltaje de escaneado de 160 kV y una intensidad de corriente de 160 μA en un detector de rayos X tipo DRX-250. El tamaño del voxel fue de 26,04 μm y se tomaron 1100 imágenes o cortes con una densidad de 2014×2014 pixels en cada una.

Diseño del experimento

Para realizar los experimentos se diseñaron tres estructuras TPMS tipo P, G y D, con valores de porosidad de 50, 60 y 70 %. Se determinaron la porosidad experimental y la permeabilidad experimental y teórica. Se buscó una regresión estadística entre porosidad y permeabilidad experimental para cada tipo de estructura y finalmente se correlacionaron la permeabilidad experimental y teórica. Por cada combinación de estructura y porosidad se realizaron cinco mediciones de repetición, para un total de 45 mediciones.

3. Resultados

Medición de la permeabilidad

Los resultados de los cálculos de la permeabilidad obtenidos por la Ley de Darcy se muestran en la tabla 1, donde la porosidad está dada en % y las permeabilidades en escala $\times 10^{-11}$ en m^2 . En las figuras 4, 5 y 6 se muestran los resultados de los análisis estadísticos para las diferentes configuraciones analizadas.

Tabla 1. Resultados de permeabilidad obtenidos por la Ley de Darcy. Fuente: autores

Estructura P		Estructura G		Estructura D	
ϕ_{Exp}	KP	ϕ_{Exp}	KG	ϕ_{Exp}	KD
50,21	8,26	48,43	9,35	46,90	10,39
50,21	8,22	48,43	9,63	46,90	10,56
50,21	8,29	48,43	9,65	46,90	10,49
50,21	8,19	48,43	10,54	46,90	10,47
50,21	8,08	48,43	10,36	46,90	10,46
60,42	9,98	58,64	10,34	56,97	10,86
60,42	9,71	58,64	10,3	56,97	10,83
60,42	9,71	58,64	10,29	56,97	10,95
60,42	10,19	58,64	10,14	56,97	10,92
60,42	10,22	58,64	9,94	56,97	10,78
70,69	10,59	69,12	11,04	67,12	11,10
70,69	10,51	69,12	11,09	67,12	11,07
70,69	10,64	69,12	11,04	67,12	11,20
70,69	10,61	69,12	11,06	67,12	11,09
70,69	10,49	69,12	11,24	67,12	11,06

Modelos de regresión para la permeabilidad

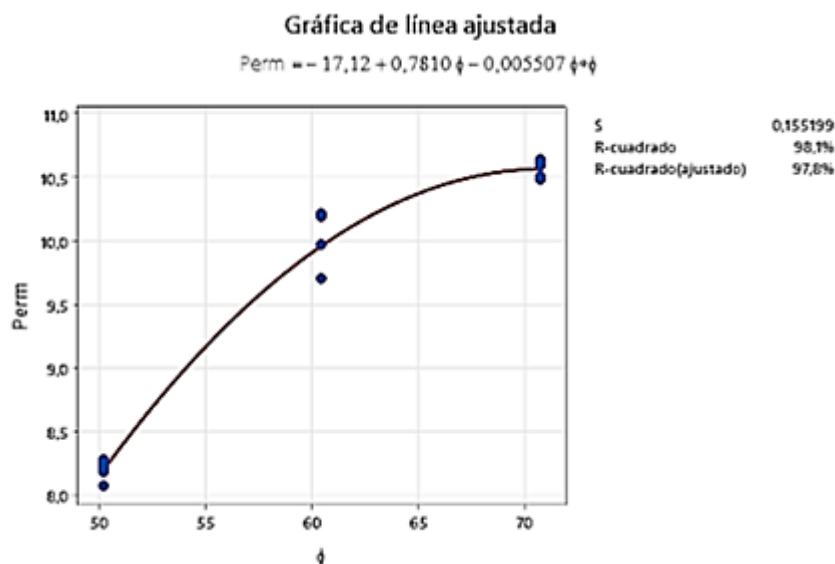
Modelo para la estructura P, tabla 2:

$$KP = -17,12 + 0,7810\phi - 0,005507\phi^2 \quad (6)$$

Tabla 2. Análisis de Varianza para la estructura P. Fuente: autores

Fuente	GL	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor p
Regresión	2	15,0223	7,51113	311,84	0,000
ϕ	1	1,5257	1,52566	63,34	0,000
$\phi*\phi$	1	1,1115	1,11152	46,15	0,000
Error	12	0,2890	0,02409		
Total	14	15,3113			

Los valores de dispersión, R^2 y R^2 (ajustado) obtenidos fueron: 0,155199; 98,11 % y 97,80%.

**Fig. 4.** Resultados de los análisis estadísticos y gráfica de ajuste cuadrático para la permeabilidad realizados en el software Minitab para la estructura P. Fuente: autores

Modelo para la estructura G, tabla 3:

$$KG=9,247-0,04211 \phi+0,000996 \phi^2 \quad (7)$$

Tabla 3. Análisis de Varianza para la estructura G. Fuente: autores

Fuente	GL	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor p
Regresión	2	4,80521	2,40261	124,19	0,000
ϕ	1	0,00430	0,00430	0,22	0,647
$\phi*\phi$	1	0,03397	0,03397	1,76	0,215
Error	10	0,19347	0,01935		
Total	12	4,99868			

Los valores de dispersión, R2 y R2 (ajustado) obtenidos fueron: 0,139092; 96,13 % y 95,36 %.

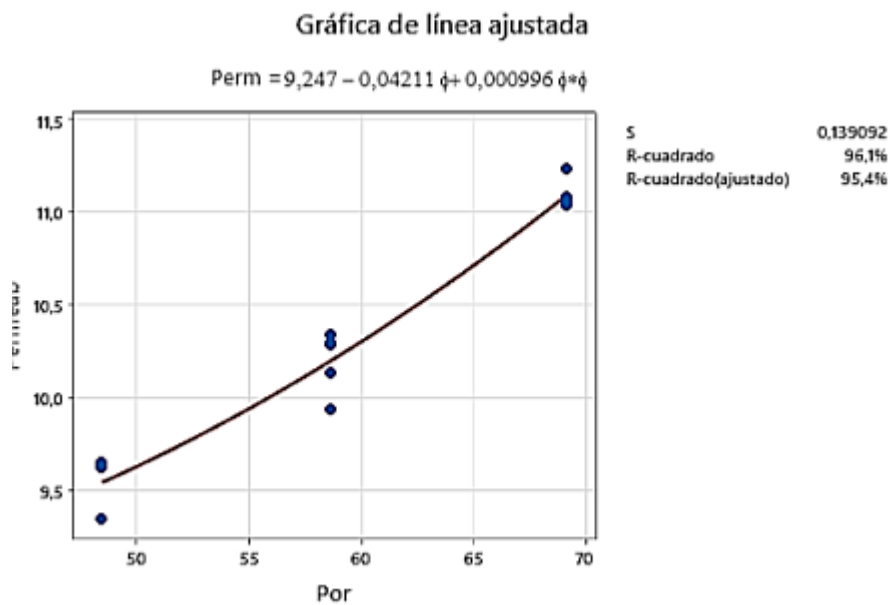


Fig. 5. Resultados de los análisis estadísticos y gráfica de ajuste cuadrático para permeabilidad realizados en el software Minitab para la estructura G. Fuente: autores

Modelo para la estructura D, tabla 4:

$$KD=6,541+0,1207 \phi+0,000785 \phi^2 \quad (8)$$

Tabla 4. Análisis de Varianza para la estructura D. Fuente: autores

Fuente	GL	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor p
Regresión	2	1,01305	0,506527	131,79	0,000
ϕ	1	0,03890	0,038896	10,12	0,008
$\phi*\phi$	1	0,02146	0,021465	5,58	0,036
Error	12	0,04612	0,003843		
Total	14	1,05917			

Los valores de dispersión, R2 y R2 (ajustado) obtenidos fueron: 0,0619946; 95,65 %, 94,92 %.

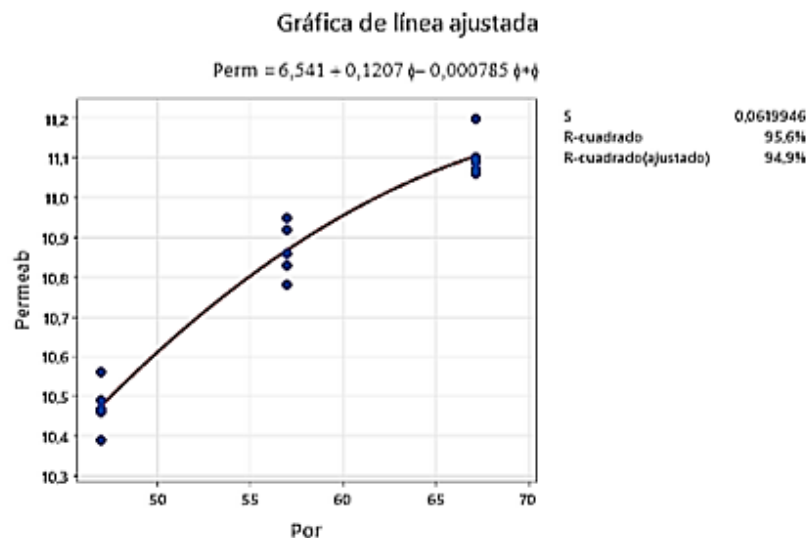


Fig. 6. Resultados de los análisis estadísticos y gráfica de ajuste cuadrático para permeabilidad realizados en el software Minitab para la estructura D. Fuente: autores

4. Discusión

Los valores de la permeabilidad teórica obtenidos están en el orden de 10^{-10} y 10^{-11} , los cuales concuerdan con los resultados reportados en la literatura científica consultada. Por otra parte, se reportó que el grado de interconectividad es mayor para las estructuras tipo D, seguidas de las de tipo G y luego las de tipo P [22], y que la porosidad es directamente proporcional a la permeabilidad. En estudios realizados utilizando CFD para varias arquitecturas SMTP [6], se plantea que la correlación entre la permeabilidad y la porosidad sigue una ley de potencias del tipo $k = C\phi^n$ con $n = 2$, muy parecida a las correlaciones obtenidas en este trabajo. Otros investigadores reportan valores de permeabilidad en el orden de 10^{-9} [23, 24] considerando una celda unitaria de 3,25 mm. Autores como [25] muestran valores de permeabilidad en el rango de 10^{-11} a 10^{-10} para una estructura Giroide con celda unitaria de $2 \times 2 \times 2$ mm, tamaño de poros de 500 μm a 1300 μm y porosidades entre 75,1 % y 88,8 %. Dado que en esta investigación se utilizó una celda unitaria de 2,11 mm, este pudiera ser un factor que afecta el flujo y disminuye los valores de permeabilidad; ya que menores valores de celda unitaria conllevan a menores tamaños de poros y a menor capacidad de circulación del fluido. Por otro lado, en la fabricación de las estructuras aparecen errores de impresión que se traducen en distorsiones con respecto al modelo CAD [26]. En la figura 7 se muestra el análisis SEM de la morfología del andamio con estructura P y una porosidad de 70 %. Se puede apreciar la presencia de errores de impresión en forma de engrosamiento de las capas, filamentos e hilos y distorsiones de las formas de los poros.

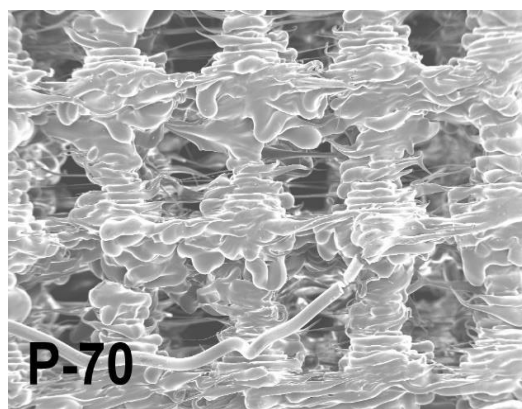


Fig. 7. Fotografía de microscopía electrónica de barrido (SEM) del andamio con porosidad de 70 %. Fuente: autores

Estas discrepancias con el modelo CAD cambian las dimensiones y formas de los poros, lo cual puede traer una variación en los valores de permeabilidad. Una posible comprobación de lo anterior incluiría un estudio de

los regímenes de flujo para establecer la presencia del régimen de Darcy ($Re < 1$) o de Forchheimer ($Re \gg 1$), donde las caídas de presión pasan de ser débilmente inerciales a fuertemente inerciales [27].

La presencia de vacíos intersticiales (cavidades y poros pequeños) en la región sólida del andamio puede dar lugar a una porosidad oculta, no calculada por diseño, que pudiera falsear los valores medidos de porosidad y de permeabilidad. Estos vacíos se muestran en la figura 8, donde se realizó una microtomografía a un andamio tipo G con 50 % de porosidad. En las zonas claras del material se señalan las cavidades que, en este caso, llegan a representar un 2,8 % del volumen de defectos totales.

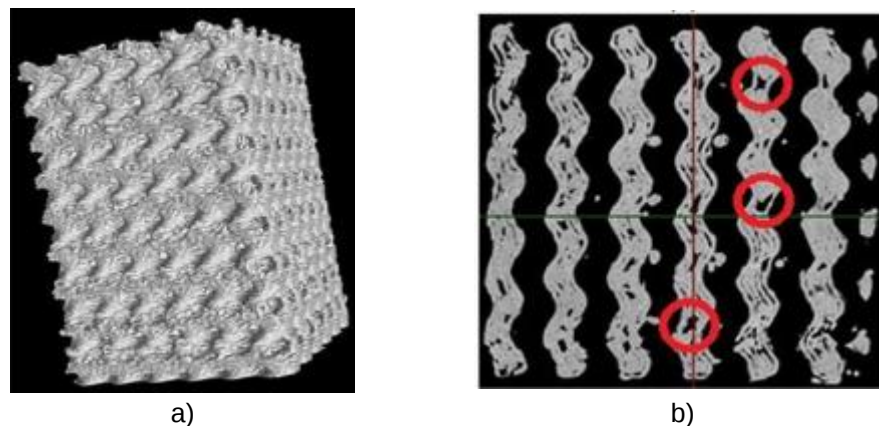


Fig. 8. Andamio tipo G. a) Microtomografía y reconstrucción 3D con 50% de porosidad, b) Cortes donde se señalan (círculos rojos) las cavidades dentro del material. Fuente: autores

Luego de realizar varios tipos de regresión con los datos, el mejor ajuste para todos los tipos de estructura es el cuadrático. En el caso de la estructura P, de acuerdo con los valores-p obtenidos para los coeficientes del modelo se puede concluir que todos son significativamente distintos de cero y deben estar en el modelo. La regresión cuadrática se evalúa como buena dado su valor-p muy bajo (casi cero). Los valores de R^2 y R^2 -ajustado no difieren mucho entre sí y son altos, por lo que es una regresión de alta calidad.

En la prueba de normalidad (de Anderson-Darling) se obtiene $p = 0,352$ mayor que 0,05, lo que indica que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, existiendo normalidad en los residuos. El análisis del gráfico de los residuos estandarizados muestra que no hay valores estadísticos erráticos, mientras que el histograma muestra que aparentemente hay una distribución normal de los residuos de regresión.

En el caso de la estructura tipo G, los valores-p de los coeficientes de regresión son altos y aunque no se puede asegurar que sean estadísticamente significativos en el modelo, existen otras evidencias estadísticas que fortalecen el criterio de ajuste cuadrático. Al realizar el ajuste lineal se obtuvo $R^2 = 70,58 \%$ y R^2 -ajustado = 68,32 %, mientras que un primer ajuste cuadrático se obtuvo un $R^2 = 76,18 \%$ y R^2 -ajustado = 72,20 %. Esto sugiere que quizás el modelo cuadrático sea más adecuado, aun cuando los valores-p de los coeficientes son muy altos. En este primer ajuste se observó que habían dos mediciones (#4 y #5) que se podían considerar erráticas (al analizar los residuos estandarizados) y luego de evaluar el modelo eliminando estos valores de mediciones de repetición, se obtuvo un modelo cuadrático con $R^2 = 96,13 \%$ y R^2 -ajustado = 95,36 %. La prueba de normalidad arrojó un $p = 0,117$ mayor que 0,05, lo cual indica que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, indicando normalidad en los residuos de regresión.

El análisis para la estructura tipo D es similar a los anteriores con un $R^2 = 95,65 \%$ y R^2 -ajustado = 94,92 %, con un $p = 0,268$ mayor que 0,05 para la prueba de normalidad, lo que indica la misma conclusión sobre la normalidad de los residuos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos con la impresora comercial Wanhao 6D muestran resultados similares a los reportados en la literatura para la fabricación de andamios, a pesar de los defectos de impresión detectados. Los modelos de regresión entre permeabilidad y porosidad para cada estructura tipo SMTP fue de un ajuste cuadrático, lo que está en concordancia con lo reportado en la revisión bibliográfica. La estructura de mayor permeabilidad de las estudiadas en la investigación son las del tipo G y D, lo que se convierten en estructuras con potenciales reales de ser aplicadas en andamios con fines médicos. En futuros trabajos se pudiera realizar el estudio teórico-experimental teniendo en cuenta los tamaños de poros y otros factores geométricos, como la tortuosidad y la interconectividad y su influencia en los valores de permeabilidad, para poder correlacionar los defectos de impresiones con los resultados obtenidos.

Referencias

- Chao L, Jiao C, Liang H, Xie D, Shen L, Liu Z. Analysis of Mechanical Properties and Permeability of Trabecular-Like Porous Scaffold by Additive Manufacturing. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021;9.
- Pires T, Dunlop JWC, Rui Fernandes P, Castro APG. Challenges in computational fluid dynamics applications for bone tissue engineering. *Proceeding of the Real Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2022;(478):20210607.
- Akbar I, Teguh Prakoso A, Martino Astrada Y, Sofyan Sinaga M, Ammarullah M, Adanta D, et al. Permeability Study of Functionally Graded Scaffold Based on Morphology of Cancellous Bone. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*. 2021;17(13):7.
- Truscetto S, Kerckhofs G, Van Bael S, Pyka G, Schrooten J, Van Oosterwyck H. Prediction of permeability of regular scaffolds for skeletal tissue engineering: A combined computational and experimental study. *Acta Biomaterialia*. 2012;8(4):1648-58.
- Jeong CG, Zhang H, Hollister SJ. Three-dimensional poly(1,8-octanediol-co-citrate) scaffold pore shape and permeability effects on sub-cutaneous in vivo chondrogenesis using primary chondrocytes. *Acta Biomaterialia*. 2011;7(2):505-14.
- Asbai-Ghoudan R, Ruiz de Galarreta S, Rodriguez-Florez N. Analytical model for the prediction of permeability of triply periodic minimal surfaces. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021;124:104804.
- Bobbert FSL, Lietaert K, Eftekhari AA, Pourn B, Ahmadi SM, Weinans H, et al. Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties. *Acta Biomaterialia*. 2017;53:572-84.
- Bidan CM, Wang FM, Dunlop JWC. A three-dimensional model for tissue deposition on complex surfaces. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2013;16(10):1056-70.
- Hu W, Sun H, Pan L, Zhang C, Shen X, Su F, et al. Poly(trimethylene carbonate)-b-poly(ethylene glycol) diblock copolymer micelles for hydrophobic drug delivery: The effect of hydrophilic/hydrophobic segment length on micellar properties and drug loading. *Polymers for Advanced Technologies*. 2022; 34(4): 1209- 1219.
- Marei NH, El-Sherbiny IM, Lotfy A, El-Badawy A, El-Badri N. Mesenchymal stem cells growth and proliferation enhancement using PLA vs PCL based nanofibrous scaffolds. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016;93:9-19.
- Germain L, Fuentes CA, van Vuure AW, des Rieux A, Dupont-Gillain C. 3D-printed biodegradable gyroid scaffolds for tissue engineering applications. *Materials & Design*. 2018;151:113-22.
- Grémare A, Guduric V, Bareille R, Heroguez V, Latour S, L'Heureux N, et al. Characterization of printed PLA scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2018;106(4):887-94.
- Deng F, Liu L, Li Z, Liu J. 3D printed Ti6Al4V bone scaffolds with different pore structure effects on bone ingrowth. *Journal of Biological Engineering*. 2021;15(1):4.
- Clarke DA, Dolamore F, Fee CJ, Galvosas P, Holland DJ. Investigation of flow through triply periodic minimal surface-structured porous media using MRI and CFD. *Chemical Engineering Science*. 2021;231:116264.
- Lu Y, Cheng L, Yang Z, Li J, Zhu H. Relationship between the morphological, mechanical and permeability properties of porous bone scaffolds and the underlying microstructure. *PLOS ONE*. 2020;15(9):e0238471.
- Liu H, Ahlinder A, Yassin MA, Finne-Wistrand A, Gasser TC. Computational and experimental characterization of 3D-printed PCL structures toward the design of soft biological tissue scaffolds. *Materials & Design*. 2020;188:108488.
- Montazerian H, Zhanmanesh M, Davoodi E, Milani AS, Hoorfar M. Longitudinal and radial permeability analysis of additively manufactured porous scaffolds: Effect of pore shape and porosity. *Materials & Design*. 2017;122:146-56.
- Abdallahman T, Scheiner S, Hellmich C. Is trabecular bone permeability governed by molecular ordering-induced fluid viscosity gain? Arguments from re-evaluation of experimental data in the framework of homogenization theory. *Journal of Theoretical Biology*. 2015;365:433-44.
- Furumoto T, Koizumi A, Alkahari MR, Anayama R, Hosokawa A, Tanaka R, et al. Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;219:10-6.
- Castro, Pires, Santos, Gouveia, Fernandes. Permeability versus Design in TPMS Scaffolds. *Materials*. 2019;12(8):1313.
- Zimmerman RW. *The Imperial College Lectures in Petroleum Engineering: Volume 5: Fluid Flow in Porous Media*. London, UK.: World Scientific Publishing Europe Ltd.; 2018.
- Diez-Escudero A, Harlin H, Isaksson P, Persson C. Porous polylactic acid scaffolds for bone regeneration: a study of additively manufactured triply periodic minimal surfaces and their osteogenic potential. *Journal of Tissue Engineering*. 2020;11:2041731420956541.
- Pires T, Santos J, Ruben RB, Gouveia BP, Castro APG, Fernandes PR. Numerical-experimental analysis of the permeability-porosity relationship in triply periodic minimal surfaces scaffolds. *Journal of Biomechanics*. 2021;117:110263.
- Ali D, Ozalp M, Blanquer SBG, Onel S. Permeability and fluid flow-induced wall shear stress in bone scaffolds with TPMS and lattice architectures: A CFD analysis. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. 2020;79:376-85.
- Ma S, Tang Q, Han X, Feng Q, Song J, Setchi R, et al. Manufacturability, Mechanical Properties, Mass-Transport Properties and Biocompatibility of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Porous Scaffolds Fabricated by Selective Laser Melting. *Materials & Design*. 2020;195:109034.
- Lu Y, Cui Z, Cheng L, Li J, Yang Z, Zhu H, et al. Quantifying the discrepancies in the geometric and mechanical properties of the theoretically designed and additively manufactured scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;112:104080.
- Santos J, Pires T, Gouveia BP, Castro APG, Fernandes PR. On the permeability of TPMS scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;110:103932..

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Alejandro González González. <https://orcid.org/0000-0003-2904-9660>

Participó en la búsqueda de información, en el diseño de la investigación, en la recolección de los datos experimentales, análisis de los resultados, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Roxana Lugo Hernández. <https://orcid.org/0009-0005-3300-6825>

Participó en el diseño de la investigación, en la recolección de los datos experimentales, análisis de los resultados, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Patricia del Carmen Zambrano Robledo. <https://orcid.org/0000-0002-9491-0069>

Participó en la obtención de datos experimentales. Trabajó en el procesamiento e interpretación de los datos recogidos para el estudio, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final

Marcelino Rivas Santana. <https://orcid.org/0000-0002-0305-515X>

Participó en el diseño de la investigación, en la recolección de los datos, en el análisis de los resultados, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Ricardo del Risco Alfonso. <https://orcid.org/0000-0002-0225-9281>

Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos experimentales, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Roberto Pérez Rodríguez. <https://orcid.org/0000-0001-5741-5168>

Participó en la búsqueda de información, análisis de los resultados experimentales, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225180427004>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Alejandro González-González, Roxana Lugo-Hernández,
Patricia del Carmen Zambrano-Robledo,
Marcelino Rivas-Santana, Ricardo del Risco-Alfonso,
Roberto Pérez-Rodríguez

**Caracterización de la permeabilidad de andamios
porosos de ácido poli-láctico fabricados con impresoras
3D comerciales**

**Characterization of the permeability of porous polylactic
acid scaffolds fabricated with commercial 3D printers**

Ingeniería Mecánica

vol. 26, núm. 2, p. 30 - 39, 2023

Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior
Politécnico José Antonio Echeverría,

ISSN-E: 1815-5944