



ANDAMIOS DE PLA FABRICADOS MEDIANTE TÉCNICAS DE IMPRESIÓN 3D: METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR UN MODELO DE COMPORTAMIENTO ORTOTRÓPICO DEL MATERIAL

GABRIELA MARTÍNEZ BORDES¹, GUILLAUME SERANDOUR^{1,2}

¹Universidad Austral de Chile

Instituto de Diseño y Métodos Industriales, Facultad de Ciencias de la Ingeniería

²Universidad Austral de Chile

Laboratorio Leufülab, Facultad de Ciencias de la Ingeniería

(Recibido 13 de septiembre de 2023, para publicación 21 de noviembre de 2023)

Resumen – Los andamios en términos biomédicos, son estructuras tridimensionales porosas cuya función principal es proporcionar un lugar para alojar células de tejidos vivos. Un andamio debe cumplir con requisitos específicos, como ser biocompatible, biodegradable, tener una porosidad adecuada y ser fácil de fabricar. En este caso, en particular, para su fabricación, se ha optado por utilizar técnicas de impresión 3D, específicamente la impresión por deposición fundida (FDM), y como material, se ha elegido el ácido poliláctico (PLA), un polímero biodegradable común en la impresión 3D. Se llevaron a cabo pruebas de tracción en probetas fabricadas con PLA mediante FDM, las cuales se imprimieron en tres orientaciones distintas a saber; orientación 1 (O1), orientación 2 (O2) y orientación 3 (O3). La orientación O3 se caracteriza por tener la dirección de impresión alineada con la longitud de la probeta. Se mantuvieron constantes el tamaño de los poros, el patrón geométrico y las propiedades de impresión en todas las probetas para asegurar resultados comparables. Uno de los hallazgos importantes fue que la orientación de impresión O3 mostró una variación significativa en el módulo elástico, lo que indica que las propiedades mecánicas del material son anisotrópicas en esta dirección. Para abordar esta variación, se propuso un modelo de comportamiento ortotrópico del material. Además, se utilizó el software ANSYS para realizar simulaciones numéricas y validar los resultados experimentales. Estas simulaciones mostraron una buena correlación con los datos obtenidos en el laboratorio.

Palabras clave – Andamios, ácido poliláctico, manufactura aditiva.

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería de tejidos se refiere a la aplicación de distintos campos de la ingeniería, como la biológica, química y clínica, con el objetivo de restaurar tejido vivo. Para lograrlo, se emplean células vivas y biomateriales. Un andamio, destinado a aplicaciones biomédicas debe cumplir con requisitos específicos, como ser biocompatible, biodegradable, tener una porosidad adecuada y ser fácil de fabricar [1]. Un implante con estas características consta de tres componentes esenciales: la estructura en la que se regenerará el tejido (llamada *andamio*), el tejido celular y el factor de crecimiento [2].

Los andamios son estructuras tridimensionales porosas cuya función principal es proporcionar un lugar para alojar células de tejidos vivos. Estas estructuras ofrecen una superficie donde las células pueden adherirse, desarrollarse y multiplicarse, formando así una matriz extracelular de proteínas y carbohidratos que constituye un tejido vivo [3]. Los andamios se han empleado en diversos órganos, como tejidos óseos o tejidos blandos, y se han investigado en detalle en cuanto a su capacidad estructural, biocompatibilidad, velocidad de crecimiento celular, forma y métodos de fabricación, entre otros aspectos [4, 5].

La fabricación de andamios mediante técnicas de fabricación aditiva (AM) ha sido ampliamente explorada debido a su capacidad para brindar un soporte mecánico sólido, promover la adhesión y proliferación celular, y crear estructuras porosas complejas. Estas técnicas también son respetuosas con el medio ambiente, ya que reducen el desperdicio de materiales utilizados [6]. El modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés) se ha convertido en una de las técnicas más comunes en estas aplicaciones [7,8]. En este proceso, se construye el modelo capa por capa a partir de un material de alimentación que

se funde parcialmente, extruye y deposita mediante una boquilla calentada sobre el modelo en construcción. Después de la deposición, el material se enfría, solidifica y se une al material circundante. La boquilla se mueve hacia arriba a lo largo del eje para depositar la siguiente capa una vez que se ha completado la capa anterior [9].

Entender y caracterizar adecuadamente las propiedades mecánicas de los andamios no es sencillo, ya que dependen de diversos parámetros de fabricación. Un andamio construido mediante FDM se puede considerar como una estructura compuesta laminada con capas apiladas verticalmente. Esto significa que no solo el tipo de filamento utilizado influye en las propiedades mecánicas, sino también la secuencia de apilamiento, la velocidad y la temperatura de la impresión [10]. Diferentes autores han investigado estos efectos: Ahn y otros [10] evaluaron varios parámetros en piezas de ABS, mientras que Valean y otros [11] estudiaron la influencia de la dirección de impresión y el espesor de la capa en probetas de ácido poliláctico (PLA). Chacón y otros [12] realizaron ensayos de tracción en probetas de PLA con diferentes orientaciones de impresión, tamaños de capa y velocidades, y Abidin y otros [13] estudiaron el tamaño adecuado del poro en andamios para implantes óseos.

Además, herramientas numérico-computacionales han contribuido al desarrollo de esta tecnología. Noordin y otros [14] evaluaron computacionalmente diferentes tamaños de poro y geometrías de PLA, mientras que Gryko y otros [15] hicieron lo mismo con andamios impresos en aleación de Titanio-Aluminio-Vanadio. Karamooz Ravari y otros [16] utilizaron el modelado de elementos finitos para predecir cómo varía el módulo de elasticidad con el diámetro del poro.

En este estudio, se propone una metodología para considerar la dirección de impresión al variar el módulo elástico en cada dirección, lo que resulta en un modelo anisotrópico del material. La validez de este modelo se evaluará mediante un análisis numérico-computacional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales e impresión

Para analizar cómo la orientación de impresión afecta a los andamios, se crearon muestras de PLA en diferentes direcciones, siguiendo los ejes coordenados. Se empleó filamento de PLA de 1.75 mm de diámetro sin ningún tipo de pigmentación. En la Tabla 1 se muestran los valores estándar de las principales características mecánicas del PLA [17].

Tabla 1. Rangos de propiedades mecánicas del PLA.

Propiedades mecánicas	PLA
ρ (g/cm ³)	1,21 - 1,25
σ (MPa)	21 - 60
E (GPa)	0,35 - 3,5
ε (%)	2,5 - 6

Se diseñaron las formas de las piezas a imprimir utilizando el software Autodesk Inventor y se exportaron como archivos STL. Estos archivos se utilizaron luego en el programa de impresión 3D Ultimaker-Cura. verse pueden observar las dimensiones clave de las muestras en la Fig. 1.

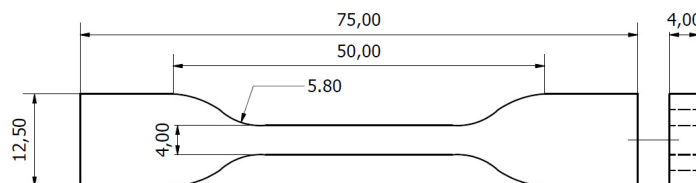


Fig. 1. Dimensiones de las probetas impresas. Medidas en mm.

Las muestras se crearon utilizando una impresora comercial llamada Creality Ender 3. En la Tabla 2 se detallan los principales ajustes de impresión empleados.

Tabla 2. Valores de los parámetros de impresión.

Parámetros	Valores constantes
Altura de la capa	0,1 mm
Ancho de línea	0,4 mm
Patrón de relleno	Líneas (0° y 90°)
Porosidad	30%
Velocidad de impresión	18 mm/s
Diámetro de la boquilla	0.4 mm
Diámetro del filamento	1.75 mm
Temp. de extrusión	210°C
Temperatura de la base	110°C

Fuente: elaboración propia.

En la Fig. 2 se ilustra cómo se imprimieron las muestras, donde O1 representa la impresión en posición horizontal, O2 la posición lateral y O3 la posición vertical.

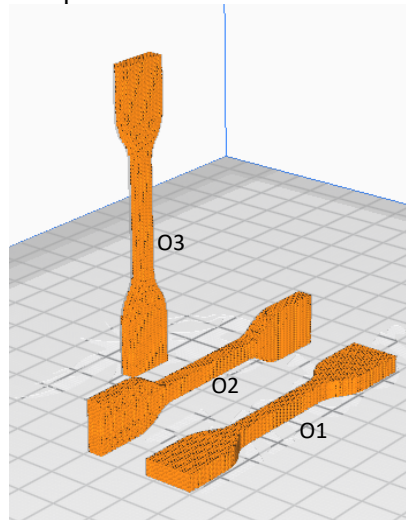


Fig. 2. Probetas. Imagen de Cura Ultimaker de las diferentes orientaciones en estudio.

2.2. Evaluación experimental

Los ensayos de tracción uniaxial se llevaron a cabo siguiendo la norma ASTM D638-10 [18]. Aunque esta norma no está específicamente diseñada para procesos de fabricación por impresión 3D, se utiliza en investigaciones de este tipo debido a que es un estándar aplicable a ensayos de tracción en plásticos en general. Se utilizó una máquina de ensayo universal Instron 4400 con una capacidad de 50 kN, y aplicando una velocidad de carga constante de 2 mm/min.

Para medir las deformaciones, se registró el incremento en la separación entre las mordazas de la máquina. Este procedimiento permitió calcular un valor de referencia para el módulo elástico. Antes de cada ensayo, se calibró la máquina uniendo las mordazas y aplicando una fuerza de compresión de 2N en el caso de las muestras en estudio. Luego, se separaron las mordazas y se aseguró la muestra. En cada ensayo, se varió la separación entre las mordazas, manteniéndola aproximadamente en 40 mm. Se realizaron 6 ensayos por cada tipo de orientación para un total de 18 ensayos.

Dado que el material en estudio es un polímero termoplástico, las condiciones ambientales y de almacenamiento después de abrir el envase del filamento son cruciales, ya que pueden afectar a las propiedades mecánicas. En este sentido, tanto la fabricación de las muestras como los ensayos se realizaron en un período de tiempo cercano y en condiciones ambientales similares. Aunque esto no garantiza la calidad del material, al menos establece una uniformidad en las muestras, tanto en su fabricación como en los ensayos.

Los resultados obtenidos de los experimentos se analizaron siguiendo las pautas establecidas en la norma mencionada. Para cada una de las direcciones de impresión, se calculó la resistencia máxima a la tracción (σ_u) dividiendo la fuerza máxima aplicada por el área de la sección transversal de la muestra. También se determinó el módulo de Young a la tracción (E) considerando la región lineal de la curva de esfuerzo-deformación, y se calculó el módulo de cortante (G) utilizando la siguiente relación:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

Siendo ν el coeficiente de Poisson. El coeficiente de Poisson establece la relación entre la deformación transversal de la probeta y la deformación longitudinal. Al no poseer instrumental para hallar este valor, se fijó constante en las tres direcciones 0.38. Este valor se tomó como promedio de los valores reportados por Domingo y otros [19] quienes reportaron valores de 0.37, 0.38 y 0.39 para cada dirección de impresión. Si bien no es probable que estos valores sean exactamente los mismos, la variación entre ellos no será significativa ni incide en forma predominante sobre los resultados obtenidos.

2.3. Evaluación numérico-computacional

Después de recopilar los datos sobre las propiedades mecánicas, se crean modelos numérico-computacionales de las muestras en las direcciones O1, O2 y O3. La Fig. 3 representa la orientación O1 que se ha modelado. Luego, estas geometrías se importan al software Ansys y se analizan como modelos elásticos lineales, considerando tanto la isotropía como la ortotropía. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos.

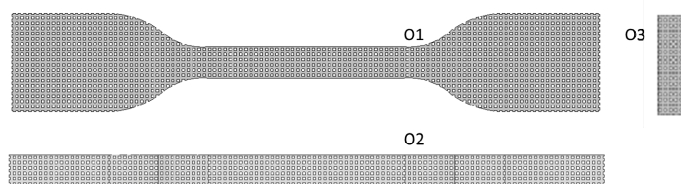


Fig. 3. Orientación del poro en función de la dirección de impresión.

Resumidamente, la metodología propuesta para determinar un modelo de comportamiento ortotrópico a partir de ensayos experimentales en andamios impresos en tres direcciones perpendiculares consiste en los siguientes pasos:

- Fabricación de muestras con patrones predefinidos impresos en tres direcciones diferentes. Se mantendrán constantes ciertos parámetros de impresión como la velocidad, temperatura, grosor de capa, porosidad, diámetro de la boquilla y patrón de impresión.
- Verificación o corrección del tamaño real de los poros impresos utilizando un microscopio óptico.
- Realización de ensayos de tracción en las tres direcciones de impresión.
- Generación de curvas de esfuerzo-deformación. Para cada dirección de impresión se determinarán el módulo elástico y el esfuerzo máximo, junto con su correspondiente desviación estándar.
- Creación de modelos computacionales de las muestras en cada una de las direcciones de impresión.
- Evaluación numérica computacional de las muestras teniendo en cuenta la anisotropía medida.
- Elaboración de conclusiones basadas en los resultados obtenidos.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. De la impresión de probetas

Como resultado del proceso de impresión 3D, se presenta la Fig. 4a. A continuación, se procedió a medir el tamaño de los poros y calcular la porosidad real utilizando un microscopio óptico, como se muestra en la Fig. 4b. Esto nos permitió determinar el tamaño real de los poros impresos y establecer el área efectiva de la sección transversal de las muestras que se ensayarán.

En la Fig. 4c, el área sombreada en azul representa el área neta de la muestra cuando se somete a ensayo de tracción en la orientación O1. De manera similar, en la Fig. 4d, el área sombreada representa el área neta de la muestra en la orientación O3. Cabe mencionar que la muestra en la orientación O2 comparte la misma forma que la orientación O1.

La Tabla 3 proporciona información sobre el área total de las muestras y la correspondiente área neta. Se observa que tanto la orientación O1 como la orientación O2 tienen la misma sección transversal, lo cual es coherente, ya que ambas tienen una forma cuadrada. Sin embargo, el área de la orientación O3 es significativamente mayor debido a la rotación de los poros en la dirección de impresión.

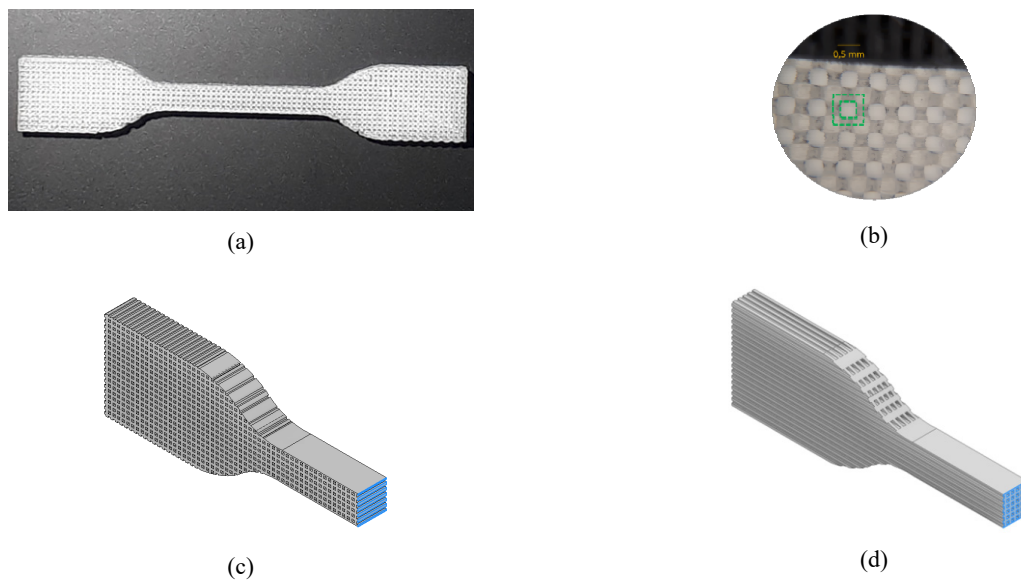


Fig. 4. Impresión de probeta en orientación 1 (a), Vista magnificada con microscopio óptico de 50x mostrando tamaño de poro (b), corte de sección transversal a la dirección de carga de la probeta O1(c), corte de sección transversal a la dirección de carga de la probeta O3.

Tabla 3. Secciones transversales de probetas.

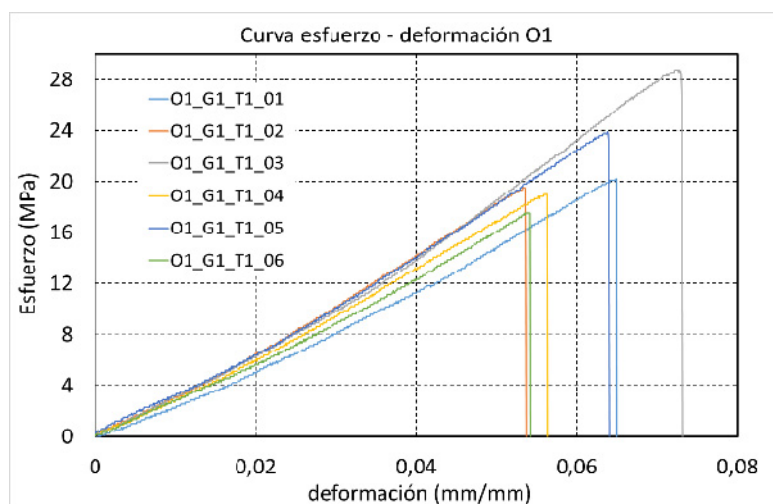
Probeta	Área probeta (mm ²)	Área Efectiva de probeta (mm ²)
O1_01	17,31	7,84
O1_02	16,63	7,84
O1_03	17,10	7,84
O1_04	16,71	7,84
O1_05	16,82	7,84
O1_06	16,95	7,84
O2_01	17,93	7,84
O2_02	18,15	7,84
O2_03	18,15	7,84
O2_04	18,28	7,84
O2_05	18,23	7,84
O2_06	18,06	7,84
O3_01	18,23	11,61

O3_02	18,23	11,61
O3_03	18,79	11,61
O3_04	19,27	11,61
O3_05	19,66	11,61
O3_06	18,40	11,61

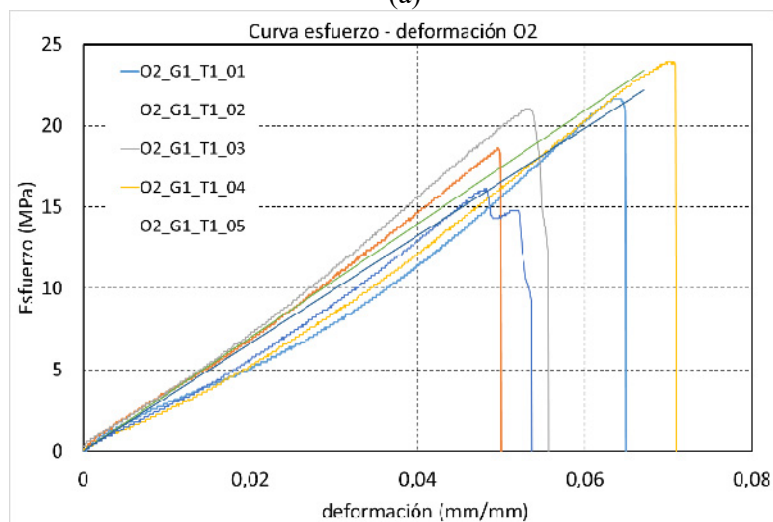
3.2. De los ensayos experimentales

La Fig. 5 presenta las curvas que muestran la relación entre el esfuerzo y la deformación para las orientaciones O1, O2 y O3. Es evidente la similitud entre las orientaciones O1 y O2, mientras que la orientación O3 muestra diferencias notables tanto en resistencia como en módulo elástico. Esto concuerda con resultados obtenidos por otros investigadores [12,20]. En la Fig. 5(b), se muestran solo 5 de las 6 curvas ensayadas debido a la rotura frágil de una muestra (O2_G1_T1_06).

La Tabla 4 proporciona los valores del módulo de Young neto, la resistencia máxima a tracción, el desplazamiento y la fuerza máxima promedio para cada una de las orientaciones. Los valores entre paréntesis representan la desviación estándar. Es importante destacar que el área utilizada para las representaciones en las figuras corresponde al área neta de la sección transversal de cada orientación (ver Tabla 3). Se destaca que tanto el módulo de Young como la resistencia máxima a tracción son muy similares en las orientaciones O1 y O2, mientras que la orientación O3 muestra diferencias significativas.



(a)



(b)

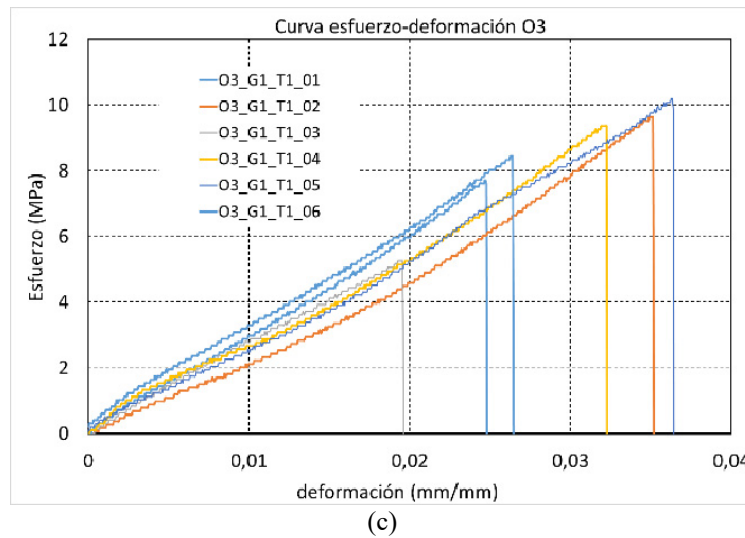


Fig. 5. Curvas esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas. Orientación O1 a), Orientación O2 b), Orientación O3 c).

Tabla 4. Valores promedio de cada orientación en estudio.

Orien- tación	E_{neto} (Mpa)	σ_{u-neto} (Mpa)	Pmáx(N)	Desp máx(mm)
O1	356,3(25,4)	21,6(4,3)	166,2(18,7)	2,2(0,2)
O2	360,6(7,6)	21,5(3,3)	161,2(25,5)	2,2(0,3)
O3	211,4(8,76)	8,7(1,7)	107,5(12,9)	1,5(0,3)

Fuente: elaboración propia.

Aunque no se disponía de un extensómetro para medir con precisión estos valores, como se recomienda en la norma, es importante señalar que el objetivo principal de este proyecto no era determinar valores exactos de estos parámetros, sino más bien establecer una metodología para tener en cuenta la anisotropía del material.

3.3. De los modelos numéricos

Se llevaron a cabo un total de seis evaluaciones numérico-computacionales. Las primeras tres evaluaciones consistieron en analizar cada una de las orientaciones utilizando un modelo isotrópico del material. Para estas tres orientaciones, se tomó como valor del módulo de Young el promedio de los módulos elásticos obtenidos.

Las siguientes evaluaciones se realizaron utilizando un modelo ortotrópico que se generó a partir de las curvas obtenidas (manteniendo el módulo de Poisson en 0.38). La Tabla 5 presenta los valores correspondientes a los modelos isotrópicos y ortotrópicos.

Una vez que se modelaron las muestras en cada una de las orientaciones, se procedió a utilizar el software Ansys 2022R1 para llevar a cabo las evaluaciones numérico-computacionales. Se generaron mallas para los tres modelos de muestras y se realizaron los análisis de convergencia necesarios. Debido al tamaño de los poros, los modelos resultaron en un gran número de elementos, por lo que se aplicaron condiciones de simetría para facilitar los análisis. En consecuencia, la geometría con orientación O1 consta de 806,670 elementos tetraédricos de cuatro nodos, la geometría O2 tiene 864,970 elementos, y la geometría O3 contiene 779,753 elementos.

Tabla 5. Valores de las propiedades mecánicas de los modelos isotrópicos y ortotrópicos.

Orientación	O1	O2	O3
Isotrópico			
E(MPa)		309	
ν		0,38	
G(MPa)		113	
Ortotrópico			
E1(MPa)	356,31	360,31	211,36
E2(MPa)	360,67	356,31	360,31
E3(MPa)	211,36	211,36	356,31
V12	0,38	0,38	0,38
V13	0,38	0,38	0,38
V23	0,38	0,38	0,38
G12(MPa)	76,45	76,45	129,10
G13(MPa)	130,68	129,10	130,68
G23(MPa)	129,10	130,68	76,45

Fuente: elaboración propia.

Para cada una de las muestras, se establecieron condiciones de sujeción en un extremo y se controló el desplazamiento en el otro extremo. El valor de desplazamiento se ajustó según lo indicado en la Tabla 4. Además, se definió un punto de control para medir los esfuerzos en el centro de la muestra. Estas mismas coordenadas se utilizaron en ambos modelos, tanto en el modelo isotrópico como en el modelo ortotrópico, para cada orientación. La Fig. 6 muestra la representación gráfica de los esfuerzos en la muestra con material ortotrópico como resultado de la simulación.

La Tabla 6 recopila los valores de los esfuerzos y las fuerzas máximas alcanzadas a los desplazamientos indicados en la Tabla 4 para cada orientación. Estos valores se presentan tanto para las muestras considerando un material isotrópico como para las muestras considerando un material ortotrópico.

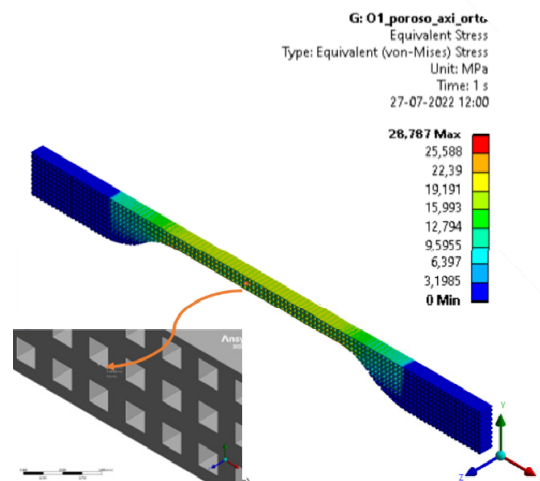


Fig. 6. Distribución de esfuerzos en probeta O1 con material ortotrópico.

Tabla 6. Valores de esfuerzo y carga últimos en modelos experimental, isotrópico y ortotrópico.

	O1	
	σ_u (Mpa)	Pmáx (N)
Experimental	21,6	166,2
Isotrópico	19,90	149,0
Ortotrópico	22,1	166,3

O2		
	σ_u (Mpa)	P_{máx} (N)
Experimental	21,5	161,2
Isotrópico	20,2	151,2
Ortotrópico	22,5	169,0
O3		
	σ_u (Mpa)	P_{máx} (N)
Experimental	8,7	107,5
Isotrópico	12,2	139,9
Ortotrópico	8,5	99,1

Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran una gráfica para cada orientación (O1, O2 y O3) de las curvas esfuerzo deformación de la data experimental (promediada con la desviación estándar), del modelo numérico con material isotrópico y del modelo numérico con material ortotrópico.

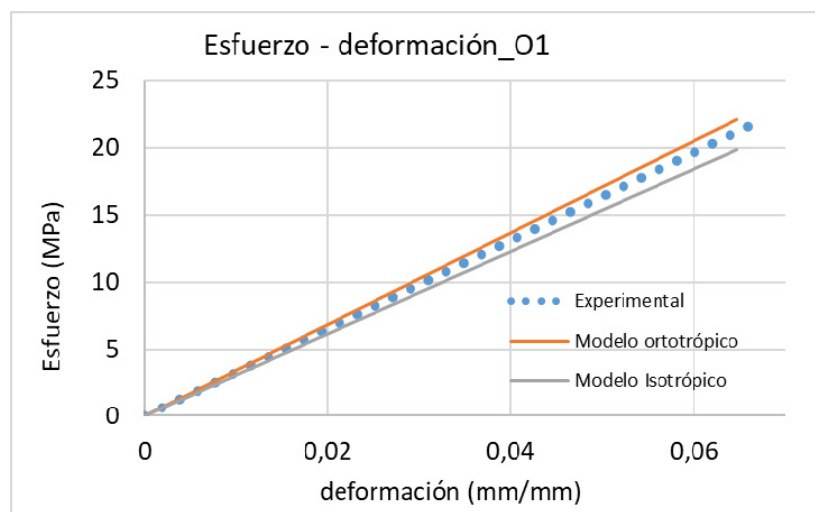


Fig. 7. Comparación de modelos experimental, isotrópico y ortotrópico en la orientación O1.

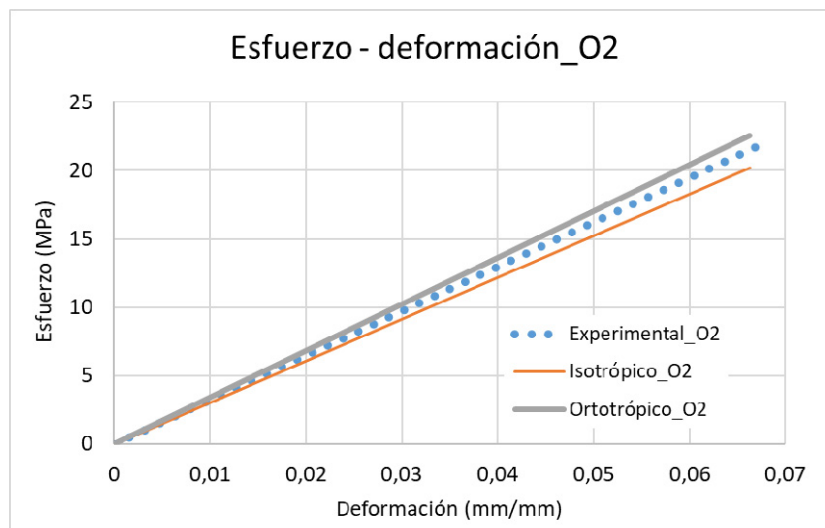


Fig. 8. Comparación de modelos experimental, isotrópico y ortotrópico en la orientación O2.

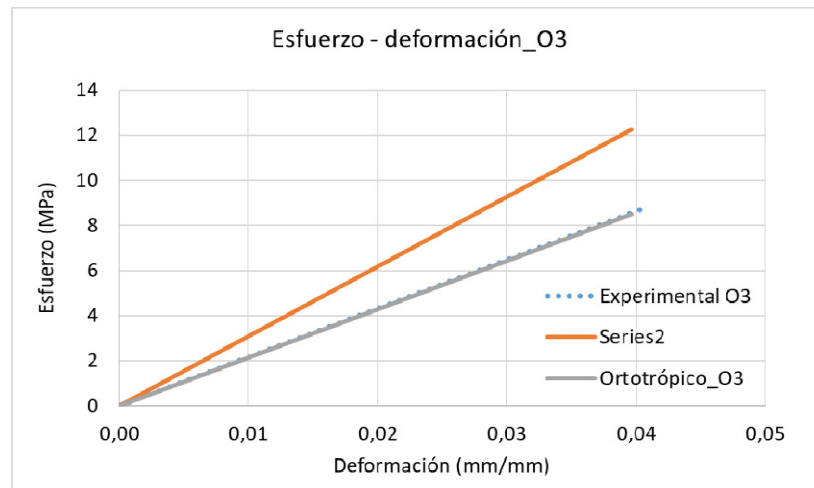


Fig. 9. Comparación de modelos experimental, isotrópico y ortotrópico en la orientación O3.

Los resultados de la Tabla 6 y las representaciones en las Figuras 7, 8 y 9 indican claramente que emplear un modelo ortotrópico en la evaluación numérica es más apropiado que utilizar un modelo isotrópico. Esto se hace especialmente evidente en la Fig. 9, que muestra el ensayo de tracción en la dirección vertical de la muestra. En este caso, que es el más crítico desde un punto de vista estructural, el modelo ortotrópico se ajusta de manera muy precisa a la realidad. El uso de un modelo isotrópico podría ser bastante inexacto, con un error de aproximadamente el 34% con respecto al valor real.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La creación de andamios biomédicos mediante la tecnología de impresión por deposición fundida es una técnica innovadora que se está evaluando ampliamente desde diversas perspectivas. Comprender las propiedades mecánicas, entre otras variables, es crucial, ya que estos dispositivos desempeñan un papel importante en la estructura.

El PLA es un material biocompatible y biodegradable que, en combinación con otros materiales, tiene un gran potencial para fabricar andamios. Sin embargo, debido a la naturaleza de su producción, sus propiedades mecánicas pueden verse afectadas. Entre los parámetros de fabricación más significativos se encuentra la dirección de impresión del andamio, por lo que se propone un modelo de comportamiento ortotrópico para considerar esta variable.

La metodología presentada tiene como objetivo desarrollar un modelo de comportamiento ortotrópico simple del material para tener en cuenta cómo la dirección de impresión influye en la respuesta estructural del andamio. Este modelo se aproxima mejor a la realidad en comparación con un modelo isotrópico.

Además, los resultados de este estudio indican que, además de la dirección de impresión, existen otras variables que afectan el comportamiento del material. Se sugiere investigar otros parámetros como la velocidad y la temperatura de impresión, el tamaño y la forma de los poros, entre otros.

Es importante caracterizar de manera adecuada el coeficiente de Poisson, para lo cual se necesita medir este parámetro o utilizar el modelo ortotrópico propuesto por Dominto-Espin y otros [19].

En cuanto al modelo numérico propuesto, se sugiere la creación de modelos de homogeneización que puedan representar el comportamiento estructural de geometrías más complejas, lo que podría resultar en un ahorro significativo de recursos y tiempo.

Se destaca, como limitación de los casos de estudio, que se utilizó un tipo específico de impresora, la cual no está certificada para uso médico, al igual que el filamento. Será necesario, para futuras investigaciones tomar en cuenta estas dos variables. Adicionalmente es importante destacar que, dada la necesidad de utilizar un proceso de esterilización de estas estructuras, la evaluación experimental de las mismas

tendría que realizarse pre y post esterilización. Si bien esto no tendría que afectar la característica ortotrópica fundamental en estas estructuras, puede variar la resistencia de estas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren hacer público su agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación, Desarrollo y Creación Artística de la Universidad Austral de Chile por financiar esta investigación a través del Proyecto de Instalación en Ingeniería 2020-03 n°: 13163235.

REFERENCIAS

- [1] N. Rodrigues, M. Benning, A. Ferreira, L. Dixon, K. Dalgarno, "Characterisation of Porous PLA Scaffolds". *Procedia CIRP*, 49, 33-38 (2016)
- [2] T. Shick, A. Abdul Kadir, N. Ngadiman, A. Ma'aram, "A review of biomaterials scaffold fabrication in additive manufacturing for tissue engineering". *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, **34**(6), 415-435 (2019) doi:10.1177/0883911519877426
- [3] B. Derby, "Printing and prototyping of tissues and scaffolds." *Science*, 338.6109, 921-926 (2012) <https://doi.org/10.1126/science.1226340>
- [4] K. Cea, M. Donoso, G. Sérandour, G. Martínez, L. Alegría, "Evaluation of Parameters in PLA and PCL Scaffolds to be Used in Cartilaginous Tissues". *Mexican Journal of Biomedical Engineering*, **42**(2), 149-159 (2021) <http://www.rmib.mx/index.php/rmib/article/view/1178>
- [5] B. Banjanin, G. Vladoic, M. Pal, S. Balos, M. Dramicanin, M. Racko, I. Knetevic, "Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology". *Rev Mater.*, **23**(4), e12250 (2018) <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0584>
- [6] G.H. Wu, S.H. Hsu, "Review: polymeric-based 3D printing for tissue engineering". *J Med Biol Eng.*, **35**(3), 285-292 (2015)
- [7] B. Tyler, D. Gullotti, A. Mangraviti, T. Utsuki, H. Brem, "Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications". *Adv Drug Deliv Rev.*, **15**(107), 163-175 (2016) Epub 2016 Jul 15. PMID: 27426411 <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.018>
- [8] F. Senatov, K. Niaza, M. Zadorozhnyy, A. Maksimkin, S. Kaloshkin, Y. Estrin, "Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds". *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, **57**, 139-148 (2016)
- [9] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco, C. Pappalettere, "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory". *Materials & Design*, **90**, 453-458 (2016). ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009>
- [10] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS". *Rapid Prototyping Jour.*, **8**(4), 248-257 (2002) <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- [11] C. Vălean, L. Marşavina, M. Mărghiţaş, E. Linul, J. Razavi, F. Berto, "Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens". *Procedia Structural Integrity*, **26**, 313-320 (2020), ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.040>
- [12] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection". *Mater. Des.*, **124**, 143-157 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- [13] Z. Abidin, I. Fadhlurrahman, I. Akbar, R. Putra, A. Prakoso, M. Kadir, ... H. Basri, "Numerical Investigation of the Mechanical Properties of 3D Printed PLA Scaffold". In 5th FIRST T1 T2 2021 International Conference, 83-89 (2022)
- [14] M. Noordin, S. APbM, N. Ngadiman, N. Mustafa, Y. NbM, Y.A. Ma'aram, "Finite element analysis of porosity effects on mechanical properties for tissue engineering scaffold". *Biointerface Res Appl Chem*, **11**(2), 8836-8843 (2021) <https://doi.org/10.33263/BRIAC112.88368843>
- [15] A. Gryko, P. Prochor, E. Sajewicz, "Finite element analysis of the influence of porosity and pore geometry on mechanical properties of orthopaedic scaffolds". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **132** 105275 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105275>

- [16] M.R. Karamooz Ravari, M. Kadkhodaei, M. Badrossamay, R. Rezaei, “Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 88, 154-161 (2014) ISSN 0020-7403, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.08.009>
- [17] S. Farah, D. Anderson, R. Langer, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review”. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 367-392 (2016) <http://dx.doi.org/10.1016/J.ADDR.2016.06.012>
- [18] [ASTM Standard test method for tensile properties of plastics Annual Book of ASTM Standards, 10, 1-16 (2010)]
- [19] M. Domingo-Espin, J. Puigoriol-Forcada, A. Garcia-Granada, J. Llum`a, S. Borros, G. Reyes, “Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts”. *Materials & Design*, 83, 670-677 (2015) <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>
- [20] R. Ferreira, I. Amatte, T. Dutra, D. Bürger, “Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers”. *Composites Part B: Engineering*, 124, 88-100 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013>

PLA SCAFFOLDS MANUFACTURED BY 3D PRINTING TECHNIQUES: METHODOLOGY TO DEVELOP AN ORTHOTROPIC BEHAVIOR MODEL OF THE MATERIAL

Abstract – Scaffolds, in biomedical terms, are porous three-dimensional structures whose main function is to provide a place to house living tissue cells. A scaffold must be biocompatible, biodegradable, having adequate porosity and being easy to manufacture. In this case, for its manufacture, 3D printing techniques have been chosen, specifically fused deposition modeling (FDM), and polylactic acid (PLA), a biodegradable polymer, has been chosen as the material. common in 3D printing. Tensile tests were carried out on specimens made of PLA by FDM, which were printed in three different orientations: orientation 1 (O1), orientation 2 (O2) and orientation 3 (O3). The O3 orientation is characterized by having the printing direction aligned with the length of the specimen. Pore size, geometric pattern, and printing properties were held constant across all test specimens to ensure comparable results. An important finding was that the O3 print orientation showed significant variation in the elastic modulus, in this direction. To address this variation, an orthotropic material model was proposed. In addition, the ANSYS software was used to perform numerical simulations and validate the experimental results. These simulations showed a good correlation with the data obtained in the laboratory.

Keywords – Scaffolding, Polylactic Acid, Additive Manufacturing.