

Caracterización mecánica de piezas de ácido poliláctico, policaprolactona y Lay-Fomm 40 fabricadas por modelado de deposición fundida, en función de los parámetros de impresión

Mechanical characterization of polylactic acid, polycaprolactone and Lay-Fomm 40 parts manufactured by fused deposition modeling, as a function of the printing parameters

Jessica Zuleima Parrado-Agudelo
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
jzparradoa@unal.edu.co

Carlos Narváez-Tovar
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
canarvaezt@unal.edu.co

Resumen– El presente estudio tuvo como finalidad la determinación de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas por modelado de deposición fundida (FDM), empleando tres diferentes materiales biocompatibles: ácido poliláctico (PLA), policaprolactona (PCL) y Lay-Fomm 40. Así mismo, se analizó la influencia de diferentes parámetros de impresión en el comportamiento mecánico: la selección, el material, el ángulo de trama y el porcentaje de relleno. Se realizaron pruebas de tensión y compresión de las probetas en una máquina de ensayos universal y se obtuvo el módulo elástico, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último a partir de las curvas de esfuerzo-deformación. Las mayores resistencias se reportan en las probetas de PLA, tanto a tensión como a compresión, por ejemplo, el promedio del esfuerzo último a tensión del PLA con ángulo de trama 0-90° y porcentaje de relleno del 30% fue de 41.20 MPa, mientras que para el PCL fue de 9.68 MPa. Por otro lado, el material con mayores elongaciones fue el Lay-Fomm 40 con porcentajes que van desde 300% hasta el 600%. Finalmente, mediante un análisis ANOVA se determinó que la selección del material es el parámetro que más influye en las propiedades mecánicas, contribuyendo en un 84.20% al módulo elástico, en 93.30% al esfuerzo a fluencia y un 82.44% al esfuerzo último, mientras que el ángulo de trama es el segundo factor significativo, presentando mayores resistencias en las probetas con ángulo de trama 0-90°. Por otro lado, la contribución del porcentaje de relleno no fue estadísticamente significativa. Los resultados obtenidos pueden ser usados para determinar el material y parámetros de impresión 3D adecuados para la manufactura aditiva de scaffolds, implantes y demás estructuras para aplicaciones biomédicas y de ingeniería de tejidos.

Palabras clave– Modelado de deposición, fundida FDM, ácido poliláctico PLA, policaprolactona PCL, Lay-Fomm 40, caracterización mecánica, parámetros de impresión.

Abstract– This study aims to determine the mechanical properties of parts manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) using three biocompatible polymer materials: Polylactic Acid (PLA), Polycaprolactone (PCL) and Lay-Fomm 40. Also, it was analyzed the influence of different printing parameters, material selection, infill percentage, and raster angle, over the mechanical properties. The samples were subjected to tension and compression tests using a universal testing machine, and elastic modulus, yield stress, and ultimate stress were obtained from the stress-strain curves. PLA samples have the highest elastic modulus, yield stress and ultimate stress for both compression and tension tests, for example, the ultimate tensile stress with infill percentage of 30 % and raster angle of 0-90° has an average value of 41.20 MPa, while PCL samples had an ultimate tensile stress average value of 9.68 MPa. On the other hand, Lay-Fomm40 samples had the highest elongations, with percentage values between 300 and 600 %. Finally, ANOVA analysis showed that the choice of the material is the leading printing parameter that contributes to the mechanical properties, with percentages of 84.20% to elastic modulus, 93.30% to yield stress, and 82.44% to ultimate stress. The second important factor is the raster angle, with higher strengths for the 0-90° when compared to 45-135°. On the other hand, the contribution of the infill percentage to the mechanical properties was no statistically significant. The obtained results could be useful for material selection

and 3D printing parameters definition for additive manufacturing of scaffolds, implants, and other structures for biomedical and tissue engineering applications.

Keywords– Fused deposition modeling FDM, polylactic acid PLA, polycaprolactone PCL; Lay-Fomm 40, mechanical characterization, printing parameters.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, es una de las megatendencias industriales más importantes y se ha constituido en un elemento fundamental para la industria 4.0 [1]. Gracias a la posibilidad de fabricar objetos capa por capa [2], la manufactura aditiva permite la producción de piezas con geometrías complejas, reduciendo los desperdicios de materia prima y la necesidad de emplear montajes complicados como los requeridos en procesos de manufactura convencionales, presentando una curva de costos de producción poco sensible al número de piezas [3]. Aunque inició como una tecnología para realizar prototipado rápido en materiales poliméricos, la manufactura aditiva permite fabricar componentes de uso final con geometrías complejas, empleando una amplia variedad de materiales que incluye cerámicos, metales, compuestos y biomateriales [4].

De las diferentes tecnologías existentes para manufactura aditiva, el Modelado de Deposición Fundida o FDM (por sus siglas en inglés, Fused Deposition Modeling), es la más popular debido a su facilidad de operación, versatilidad y economía [5]. Una de las principales problemáticas que presenta esta tecnología es la elección de los parámetros de impresión correctos de acuerdo con el material [6], ya que estos afectan las propiedades mecánicas y la capacidad de uso final de la pieza [7]. Se han realizado diferentes estudios en los que se analiza la dependencia de las propiedades mecánicas con los parámetros de impresión para piezas fabricadas con filamentos de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y ácido poliláctico (PLA) [8-11], materiales poliméricos que son usados frecuentemente con este tipo de tecnología por ser los más estables [5].

Debido al creciente interés por las aplicaciones biomédicas de la tecnología FDM, como por ejemplo para la fabricación de estructuras bio ins-

piradas o prótesis personalizadas, aparte del PLA han aparecido en el mercado nuevos filamentos biocompatibles de polímeros rígidos como la policaprolactona (PCL) [12] y polímeros porosos como el Lay-Fomm [13], el cual es un material de impresión experimental aplicable a la ingeniería de tejidos debido a las porosidades que se generan tras disolver en agua uno de sus componentes, lo que le otorga un comportamiento altamente flexible [14].

Este trabajo reporta las propiedades mecánicas en función a los parámetros de impresión para probetas fabricadas por FDM, empleando filamentos de PLA; PCL y Lay-Fomm40. A través de un ANOVA, se determinó el efecto que tenía la selección del material, el ángulo de trama y el porcentaje de material en el módulo de elasticidad, la resistencia de fluencia y el esfuerzo último, propiedades que fueron obtenidas experimentalmente a través de ensayos de tracción y compresión en una máquina de ensayos universal. Los resultados de este trabajo pueden ser usados para determinar los materiales y parámetros de impresión adecuados para fabricar estructuras porosas que tengan aplicaciones biomédicas y de ingeniería de tejidos, como por ejemplo scaffolds para tejido óseo o implantes para reconstrucción del oído externo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Manufactura Aditiva con tecnología FDM

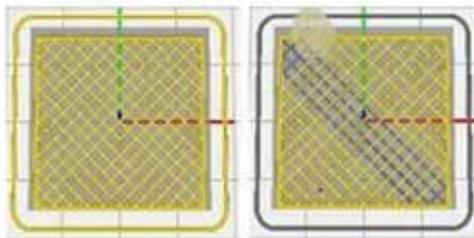
Durante todo el proceso de determinación de parámetros, pruebas de impresión y fabricación de probetas se emplearon diferentes equipos de impresión 3D con tecnología FDM: una impresora Creator Pro de la marca Flashforge, una impresora Prusa i3 y una impresora FDM de la empresa colombiana Fabrilab. En general, independiente de la tecnología empleada, el proceso de impresión 3D se puede resumir en las siguientes etapas [2,3]: Modelado CAD de la pieza por imprimir, generación del archivo STL, procesamiento del archivo STL para el corte por capas de la pieza; determinación de los parámetros de impresión de acuerdo con el material, la impresión capa por capa de la pieza, y postprocesos de acabado.

Para todas las piezas se decidió emplear un espesor de capa de 0.2 mm y un ancho de pared de 0.8 mm. Las probetas de PLA y PCL fueron impre-

Las piezas con un patrón tipo GRID, mientras que las de Lay-Fomm 40 se fabricaron empleando el patrón LINE. El patrón GRID imprime por capa una cuadrícula con una dirección determinada, como se observa en la Fig.1, mientras que el patrón LINE imprime en la primera capa una serie de líneas paralelas entre sí en una dirección determinada, y en la siguiente capa imprime otra serie de líneas paralelas, pero en la dirección transversal a las de la capa anterior; repitiendo este proceso hasta terminar la pieza como se aprecia en la Fig. 2.

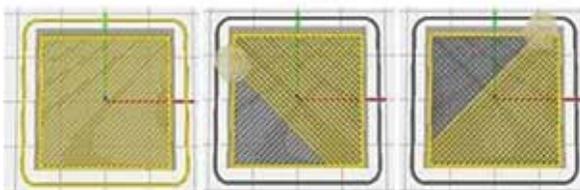
Para las probetas de tensión se emplearon dos ángulos de trama diferentes, 0-90° y 45-135°, como se aprecia en la Fig. 3, mientras que en las probetas de compresión se empleó únicamente el ángulo de trama 0-90°. Para todos los materiales se decidió emplear porcentajes de relleno de 30 y 40%, los cuales fueron elegidos teniendo en cuenta que varias aplicaciones de ingeniería de tejidos suelen requerir estructuras porosas similares a las presentes en los huesos.

Fig. 1. PATRÓN GRID, A LA IZQUIERDA PRIMERA CAPA, A LA DERECHA SEGUNDA CAPA



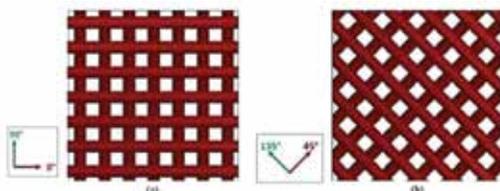
Fuente: Los autores.

Fig. 2. PATRÓN LINE, DE IZQUIERDA A DERECHA, PRIMERA, SEGUNDA Y TERCERA CAPA



Fuente: Los autores.

Fig. 3. ÁNGULOS DE TRAMA (a) 0-90°, (b) 45-135°



FUENTE: Tomado de [15].

La Tabla I resume todos los parámetros de impresión finales para cada uno de los materiales empleados, siendo importante mencionar que las probetas fabricadas con Lay-Fomm 40 fueron sometidas a un postproceso de acabado después de la impresión que consistió en dejarlas sumergidas en agua durante 4 días, para luego dejarlas secar al aire por 24 horas.

Tabla I.

PARÁMETROS DE IMPRESIÓN FINALES PARA PLA, PCL Y LAY-FOMM 40

Parámetro de impresión	PLA	PCL	Lay-Fomm 40
Temperatura de extrusión [°C]	220	110	230
Temperatura de la cama [°C]	67	25	60
Velocidad de impresión [mm/s]	60	5	40
Espesor de capa [mm]	0.2		
Espesor de pared [mm]	0.8		
Porcentaje de relleno [%]	30 y 40		
Patrón	GRID		LINE
Ventilación sobre el material extruido	NO	SÍ	NO
Ángulo de trama	Tensión: 0-90°, 45-135° Compresión: 0-90°		

Ensayos de tensión

Los ensayos de tensión se realizaron para los tres materiales siguiendo la norma ASTM D638 [16]. Se implementaron tres muestras por grupo de estudio, cada grupo tiene las mismas características de fabricación. Se ensayaron un total de 36 probetas, cuya geometría corresponde a una probeta tipo IV definida en la norma ASTM D638. La probeta tipo IV es generalmente utilizada cuando se requieren comparaciones directas entre materiales en diferentes casos de rigidez, es decir, no rígidos y semirrígidos [16]. Para las probetas de PLA y PCL se definió una velocidad de ensayo de 5 mm/min, mientras que para las de Lay-Fomm 40 fue necesario incrementar la velocidad del ensayo hasta 50mm/min, con el fin de lograr la rotura de la probeta dentro del rango de tiempo recomendado por la norma, 0.5 y 5 min [16]. En comparación con el PLA y PCL, las probetas de Lay-Fomm 40 presentaron diferencias considerables en su

espesor, generadas por la reducción de volumen que se presentaba en el material tras el postproceso de sumergir en agua y secar al aire.

2.2 Ensayos de compresión

Los ensayos de compresión fueron realizados para el PLA y PCL de acuerdo con la norma ASTM D695 [17]. El Lay-Fomm 40 no fue considerado para este ensayo debido a que es material poroso con alta flexibilidad y la norma ASTM D695 solo es aplicable para la determinación de propiedades mecánicas de plásticos rígidos. Para las pruebas de compresión se implementaron cinco muestras por grupo de estudio, cada grupo tiene los mismos parámetros de fabricación y se evaluaron un total de 4 grupos. La forma de las probetas de compresión implementadas corresponde a una probeta para materiales de espesor menor a 3.2 mm [17].

Todas las pruebas de compresión se realizaron a una velocidad de $1.3 \pm \text{mm/min}$ [17], y a partir de ellas se determinaron los módulos de elasticidad y esfuerzos últimos de compresión para los dos materiales considerados.

3. RESULTADOS

La Tabla II presenta el promedio y desviación estándar del módulo elástico (E), el esfuerzo de fluencia (σ_Y) y el esfuerzo último (σ_U) de tensión para el PLA, PCL y Lay-Fomm 40 que fueron obtenidos a partir de las pruebas de tensión, mientras que la Tabla III reporta el promedio y desviación estándar del módulo elástico a compresión (Ecompresión) y el esfuerzo último a compresión (σ_U -compresión) obtenidos para el PLA y PCL a partir de las pruebas de compresión.

Tabla II.
RESULTADOS PRUEBA DE TENSIÓN PARA PLA, PCL Y LAY-FOMM 40. : PROMEDIO, S: DESVIACIÓN ESTÁNDAR, P: PORCENTAJE DE RELLENO, A: ÁNGULO DE TRAMA

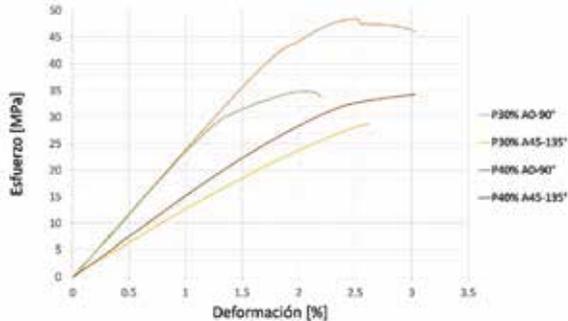
Material	P [%]	A [°]		E [MPa]	σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]
PLA	30	0-90	\bar{x}	25.96	41.2	48.37
			s	1.80	4.42	1.91
		45-135	\bar{x}	12.61	27.76	30.87
			s	0.43	2.30	2.50
	40	0-90	\bar{x}	23.88	29.67	33.04
			s	1.06	2.08	2.54
		45-135	\bar{x}	15.41	31.00	36.27
			s	0.13	1.00	1.71
PCL	30	0-90	\bar{x}	6.93	-	9.68
			s	0.14	-	1.46
		45-135	\bar{x}	4.7	6.6	7.52
			s	0.30	0.44	0.89
	40	0-90	\bar{x}	7.24	9.92	10.28
			s	0.07	0.14	0.58
		45-135	\bar{x}	4.16	6.38	6.99
			s	0.11	0.13	0.62
Lay-Fomm 40	30	0-90	\bar{x}	1.65	3.53	28.24
			s	0.18	0.42	2.16
		45-135	\bar{x}	0.72	1.77	12.26
			s	0.18	0.31	2.30
	40	0-90	\bar{x}	1.28	2.65	18.97
			s	0.18	0.39	3.17
		45-135	\bar{x}	1.07	2.82	21.50
			s	0.19	0.78	0.70

Tabla III.
RESULTADOS PRUEBA DE COMPRESIÓN PARA PLA Y PCL :
PROMEDIO, s: DESVIACIÓN ESTÁNDAR, P:
PORCENTAJE DE RELLENO, A: ÁNGULO DE TRAMA

Material	P [%]	A [°]		$E_{\text{compresión}}$ [MPa]	$\sigma_{U\text{-compresión}}$ [MPa]
PLA	30	0-90	\bar{x}	5.12	6.79
			s	2.23	2.36
	40		\bar{x}	4.89	6.86
			s	0.60	1.14
PCL	30	0-90	\bar{x}	1.96	1.32
			s	0.8	0.41
	40		\bar{x}	2.17	1.17
			s	0.70	0.36

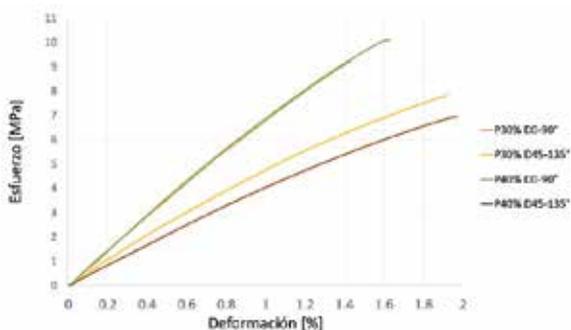
Las Figuras 4, 5, 6 y 7 muestran las curvas esfuerzo vs deformación de una probeta por grupo con el fin de visualizar el comportamiento de las muestras evaluadas.

Fig. 4. CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN DEL PLA SOMETIDO A TENSIÓN. P: PORCENTAJE DE RELLENO, A: ÁNGULO DE TRAMA



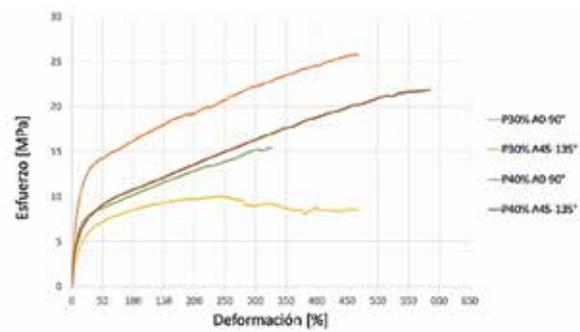
Fuente: Los autores.

Fig. 5. CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DEL PCL SOMETIDO A TENSIÓN. P: PORCENTAJE DE RELLENO, A: ÁNGULO DE TRAMA



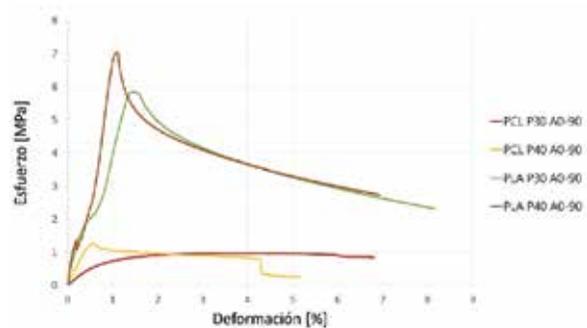
Fuente: Los autores.

Fig. 6. CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN DEL LAY-FOMM 40 SOMETIDO A TENSIÓN. P: PORCENTAJE DE RELLENO, A: ÁNGULO DE TRAMA



Fuente: Los autores.

Fig. 7. CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN PARA EL PLA Y PCL SOMETIDOS A COMPRESIÓN. P: PORCENTAJE DE RELLENO, A: ÁNGULO DE TRAMA



Fuente: Los autores.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) en el software estadístico MiniTab de los resultados anteriormente presentados en las Tablas II y III. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores [18]. Por consiguiente, a partir de este análisis se puede medir la contribución que hace cada uno de los factores y su significancia estadística.

En primer lugar, se realizó un ANOVA de las 36 muestras ensayadas a tensión, tomando como factores el material, el cual tiene 3 niveles: PLA, PCL y Lay-Fomm 40; el ángulo de trama con dos niveles: 0-90° y 45-135°; el porcentaje de material con 2 niveles: 30% y 40% y, por último, el patrón teniendo GRID para el PLA Y PCL y LINE para el Lay-Fomm 40; sin embargo, este último fue eliminado automáticamente debido a que el modelo no podía estimar ese término. Se debe agregar que para el análisis se implementó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Los resultados de los ANOVA se recopilaban en la Tabla IV.

Tabla IV.

ANOVA. ANÁLISIS DE VARIANZA Y SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA PARA EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ESTRUCTURAS DE PLA, PCL Y LAY-FOMM 40. *SIGNIFICATIVO $\alpha = 0.05$. **ALTAMENTE SIGNIFICATIVO $\alpha = 0.01$

Factores	Módulo Elástico		Esfuerzo de Fluencia		Esfuerzo último	
	Contribución [%]	Valor P	Contribución [%]	Valor P	Contribución [%]	Valor P
Material	84.20	0.000**	93.30	0.000**	82.44	0.000**
Ángulo de trama	7.73	0.000**	1.61	0.003*	4.59	0.002*
Porcentaje	0.00	0.927	0.26	0.206	0.41	0.324
Error	8.07		4.83		12.56	
Total	100		100			

A partir de los ANOVA se identificó que el módulo elástico, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último se afectaron significativamente ($P=0.000$) por la selección del material y el ángulo de trama, teniendo un $P=0.000$ para el módulo de elasticidad, $P=0.003$ para el esfuerzo de fluencia y un $P=0.002$ para el esfuerzo último. En el caso específico del módulo de elasticidad, la selección del material contribuyó un 84.20% mientras que el ángulo de trama un 7.73%. Por otra parte, la contribución de la selección del material fue del 93.30% en el esfuerzo de fluencia, mientras que el ángulo de trama aportó un 1.61%. Finalmente, para el esfuerzo último, la selección del material contribuyó en 82.44% y el ángulo de trama en un 4.59%. Por otra parte, la variación en el porcentaje de relleno no fue estadísticamente significativa presentando valores de $P > \alpha$, tomando como criterio un $\alpha = 0.05$.

Respecto a las propiedades mecánicas de las estructuras evaluadas se observa una mayor resistencia mecánica en las muestras de PLA, seguido por el PCL y finalizando con el Lay-Fomm 40. De hecho, el material es un factor que afecta significativamente las propiedades mecánicas de las estructuras, contribuyendo en más de un 80% en ellas. Por otra parte, al realizar los ANOVA para cada material por separado, se concluye que el ángulo de trama también es un factor importante debido al efecto que tiene en las propiedades mecánicas, especialmente en el módulo elástico. Precisamente, el ángulo de trama 0-90° reporta en la mayoría de los casos módulos elásticos, esfuerzos de fluencia y esfuerzos últimos más altos que los reportados en las muestras con ángulo de trama 45-135°. Esto podría deberse a la orientación de las fibras, ya que las paredes internas de las muestras coinciden con la dirección de aplicación de la fuerza, haciendo que los

filamentos soporten la carga de forma paralela [15]. Es importante aclarar que los resultados de los ANOVA se vieron afectados por la variabilidad de los datos experimentales, la cual depende de factores como la calidad de impresión, el método implementado para el cálculo del área transversal, los posibles errores instrumentales en los equipos de medición, la máquina de ensayos y en la calibración de las impresoras 3D que fueron empleadas para la fabricación de las probetas. A pesar de ello, los resultados obtenidos en este trabajo contribuyen a la ampliación de la base de datos existente en la literatura científica sobre las propiedades mecánicas y parámetros de impresión del PLA y el PCL, en especial para porcentajes de relleno bajos, pues la mayoría de trabajos emplean porcentajes de relleno mayores al 50% [10-12]. Adicionalmente, este trabajo reporta parámetros de impresión y propiedades mecánicas para un material de impresión experimental como el Lay-Fomm 40, cuya información actualmente es escasa y apenas empieza a ser reportado en la literatura científica [13].

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) y a la profesora Yuly Sánchez y Santiago Vargas Domínguez (Ph. D), por permitir el uso de la impresora 3D Creator PRO. Al profesor Edgar Espejo Mora, por permitir el uso el microscopio óptico. Al estudiante Alexis Cuero por apoyar significativamente el proceso de impresión del PCL.

REFERENCIAS

- [1] U.M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, y M. Dolen, "The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 545-554, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>

- [2] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen y S. Hammad Mian, "Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11(2), pp. 1-27, 2019. <https://doi.org/10.1177/1687814018822880>
- [3] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, y D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- [4] K.V. Wong y A. Hernández, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, Article ID 208760, 10 p., 2012. <http://dx.doi.org/10.5402/2012/208760>
- [5] T.N.A.T. Rahim, A. M. Abdullah, y H.Md. Akil, "Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites", *Polymer Reviews*, 2019. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1597883>
- [6] K.L. Álvarez, R.F. Lagos, y M. Aizpun, "Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM)", *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 24, no. Especial, pp. 17-24, 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052016000500003>
- [7] E. Cuan-Urquiza, E. Barocio, V. Tejada-Ortigoza, R.B. Pipes, C.A. Rodríguez, y A. Roman-Flores, "Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches", *Materials*, vol. 12 (6), 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12060895>
- [8] J. Cantrell et al., "Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts". En: S. Yoshida, L. Lamberti y C. Sciammarella (eds), *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, vol. 3. pp. 89-105, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11
- [9] B. Banjanin, G. Vladić, M. Pál, S. Baloš, M. Dramićanin, M. Rackov, y I. Knežević, "Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology", *Revista Matéria*, vol. 23(4), 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0584>
- [10] Z. Liu, Y. Wang, B. Wu, C. Cui, Y. Guo, y C. Yan, "A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.102, pp. 2877-2889, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03332-x>
- [11] J. Torres, M. Cole, A. Owji, Z. DeMastry, y A. Gordon, "An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22 (2), pp. 387-404, 2016. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2014-0083>.
- [12] A. Haryska, J. Kucinska-Lipka, A. Sulowska, I. Gubanska, M. Kostrzewa y H. Janik, "Medical-Grade PCL Based Polyurethane System for FDM 3D Printing—Characterization and Fabrication", *Materials*, vol. 12 (6), 2019. DOI: 10.3390/ma12060887
- [13] L. Konieczna, M. Belka, M. Okonska, M. Pyszka, y T. Baczek, "New 3D-printed sorbent for extraction of steroids from human plasma preceding LC-MS analysis", *Journal of Chromatography A*, 1545 pp. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.02.040>
- [14] MatterHackers Inc. "PORO-LAY LAY-FOMM 40 Porous Filament", 2018. [En línea]. Disponible <https://www.matterhackers.com/store/l/poro-lay-lay-fomm-filament-175mm/sk/MLWKN3PY>. [Acceso Feb. 20, 2019].
- [15] M. Velasco-Peña, J. Rodríguez-Suárez, y D. Restrepo-Ávila, "Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM", en XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2016, pp. 716-722.
- [16] ASTM, *D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1*. ASTM INTERNATIONAL, 2015. <https://doi.org/10.1520/D0638-14.1>.
- [17] ASTM, *D695 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics 1*. ASTM INTERNATIONAL, 2015. <https://doi.org/10.1520/D0695-08.2>.
- [18] Minitab Inc. "MiniTab 18 Support", 2017. [En línea] Disponible <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>. Acceso Feb. 20, 2019].