

# INVESTIGACIÓN APLICADA EN ESTRUCTURAS FUNCIONALMENTE GRADUADAS A TRAVÉS DE LA MANUFACTURA ADITIVA

## APPLIED RESEARCH ON FUNCTIONALLY GRADED STRUCTURES THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING

S. L. Rodríguez Reyna<sup>1</sup>  
I. E. Cuellar López<sup>2</sup>  
H. A. Zúñiga Pérez<sup>3</sup>  
F. Tapia Rodríguez<sup>4</sup>

### RESUMEN

Se realiza una investigación aplicada en manufactura aditiva por medio de un trabajo de colaboración entre dos universidades (pública y privada) y con apoyo de estudiantes de ingeniería. En este trabajo se determina la influencia de algunos parámetros de impresión 3D, la materia prima y el diseño de Estructuras Funcionalmente Graduadas (EFG), siendo estructuras porosas con baja densidad y buen desempeño mecánico, para maximizar esfuerzo último a la compresión en materiales poliméricos. Los materiales son PLA y PA12, 100% de relleno, dirección de impresión ( $0^{\circ}/90^{\circ}$  y  $45^{\circ}/-45^{\circ}$ ); para tensión. En compresión se modifica el porcentaje de relleno, utilizando estructuras graduadas: triangulares y hexagonales; manteniendo constante el volumen. La aportación de este artículo en impresión 3D fue lograr valores en la resistencia a la compresión superiores en las probetas en comparación a sus propios filamentos para ambos materiales PLA y PA12. Es de resaltar que el trabajo transdisciplinario, se optimizó uso de laboratorios, equipos y un mayor grado de especialidad en áreas de ingeniería, logrando un conocimiento más tangible hacia los estudiantes.

### ABSTRACT

Applied research in additive manufacturing is carried out through a collaborative work between two universities (public and private) and with the support of engineering students. This work determines the influence of some 3D printing parameters, the raw material, and the design of Functionally Graded Structures (FGS), being porous structures with low density, and good mechanical performance, to maximize ultimate compressive stress in polymeric materials. The materials are PLA and PA12, 100% filler, printing direction ( $0^{\circ}/90^{\circ}$  and  $45^{\circ}/-45^{\circ}$ ) for tension. In compression, the percentage of filler is modified using graded structures: triangular and hexagonal; keeping the volume constant. The contribution of this article in 3D printing was to achieve higher compressive strength values in the specimens compared to their own filaments for both PLA and PA12 materials. It should be noted that the transdisciplinary work optimized the use of laboratories, equipment, and a higher degree of specialization in engineering areas, achieving a more tangible knowledge for students.

### ANTECEDENTES

Se reconoce que la investigación aplicada es quien alimenta el conocimiento al observar, experimentar, formular, verificar y llegar a comprobar con principios, postulados y leyes. Al final de ello, si este conocimiento no se difunde, solo será útil para quien lo desarrollo (Hagopian, 2016). La investigación da un beneficio a la sociedad, ya que se obtiene

<sup>1</sup> Profesora Investigadora. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. sandyreyna@uaslp.mx

<sup>2</sup> Estudiante. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. a209886@alumnos.uaslp.mx

<sup>3</sup> Estudiante. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. a236375@alumnos.uaslp.mx

<sup>4</sup> Profesor Investigador. Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana de Guadalajara. ftapia@up.edu.mx

información relevante y fidedigna que permita entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento. El generar ciencia e investigación es un cimiento para el desarrollo de un país de manera seria y sistematizada en la producción de nuevo conocimiento (Calva et al, 2018).

Según Elías (2017), las universidades son las principales promotoras de generar ciencia, sería un grave error que este conocimiento solo sea alcanzado por algunos, así que, su difusión permite a la sociedad tomar decisiones más asertivas en su entorno.

Existen dos medios que generan tanto ciencia como tecnología: las empresas del sector privado y público. La industria privada se basa en un bien particular. obtiene conocimiento y éste lo aplica en tecnología, se vuelve competitiva para otros sectores del mismo giro y procura servir lo mejor a sus clientes bajo expectativas de satisfacción con estándares elevados, su retribución es el pago de sus clientes por un bien o servicio (Martín, 2011).

Una nueva era en la industria 5.0 se ha implantado en tiempos de pandemia; siendo parte de ello la Manufactura aditiva (MA). Este proceso de producción también llamado impresión 3D es por adición de material capa por capa que en su conjunto conforman objetos tridimensionales. Las industrias automotriz, aeronáutica, médica, eléctrica, entre otras, han sido capaces de desarrollar productos de geometrías muy complejas utilizando una variedad de materiales para crear objetos tridimensionales utilizando las técnicas de MA; siendo esto más complejo, caro y lento para los procesos tradicionales de producción. Dentro de la MA existen diversos métodos de impresión, pero el más utilizado es la técnica de modelado por deposición fundida, conocida por sus siglas en el idioma inglés FDM (Fused Deposition Modeling).

Una de sus mayores ventajas es generar piezas complejas sin ninguna intervención humana durante el proceso de fabricación. Además, este método tiene la capacidad de proporcionar un número ilimitado de prototipos y diseños de bajo costo. Actualmente, los prototipos son base para la producción de herramientas y productos funcionales. Los materiales más utilizados en este método de producción son: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el Ácido poliláctico (PLA), así como la Poliamida 12 (PA12). En este estudio se centrará en estos dos últimos materiales.

Las piezas fabricadas con tecnología FDM se han utilizado principalmente como prototipos, modelos educativos, modelos de ajuste y ensamblaje, inclusive la fabricación de piezas funcionales ha ido ganando importancia en diferentes campos. Es muy importante predecir el comportamiento mecánico de las piezas para evaluar su desempeño durante su uso. Por ende, el análisis de las propiedades mecánicas en las piezas fabricadas bajo FDM representa un gran interés para tecnólogos e investigadores.

Gonçalves et al. (2018) mencionan que, el método FDM tiene propiedades mecánicas más bajas que los métodos de fabricación tradicionales, ya que, las piezas hechas en FDM presentan limitaciones internas, esto se refiere a una pobre adhesión entre capas, así como, mayor porosidad.

Es por ello, que una nueva área de investigación en impresión 3D son las Estructuras Funcionalmente Graduadas (EFG) que han logrado una posición privilegiada en la impresión

3D debido a que, la técnica FDM puede generar formas complejas, además, de imprimir piezas de baja densidad y llegar a tener un buen desempeño mecánico (Duraibabu et al., 2020). Las estructuras celulares (EC) son materiales heterogéneos que tienen composición y estructura con propiedades específicas en la orientación preferida y, en caso de ser porosas se denominan Estructuras Celulares Funcionalmente Graduadas (ECFG). Presentan la ventaja de retener una resistencia cercana a la de las muestras sólidas en comparación con las estructuras totalmente porosas (El-Galy et al., 2019).

Por lo descrito, un equipo transdisciplinario formado por dos universidades, una pública y otra privada, estudia la manufactura aditiva, buscando mejor el desempeño mecánico de las piezas impresas por FDM, aplicando la mentefactura con apoyo de estudiantes de Ingeniería. Se analiza como primera parte el comportamiento mecánico a tensión de probetas impresas en distintas direcciones de impresión. Posteriormente, estudia el efecto que tiene sobre la resistencia de compresión el modificar el porcentaje de relleno (33%, 66%) y, generando EFG al modificar la geometría tridimensional bajo un patrón hexagonal y triangular. Utilizándose probetas cilíndricas con dos materiales distintos (PLA y PA12). Se discutirá el mecanismo de falla en conjunto con los valores obtenidos de los ensayos mecánicos. Finalmente, el logro de las competencias en estudiantes de ingeniería por la ejecución de la investigación aplicada.

## **METODOLOGÍA**

Este proyecto de investigación conjunta nació a partir de la necesidad de la construcción de *Drones Urbanos* para contingencias humanas. La disponibilidad de piezas de alta calidad, con bajo costo fue un factor decisivo para unir mentes especializadas en las áreas en ingeniería de materiales, mecánica y aeronáutica.

Las pruebas y preparación de probetas fueron realizadas por estudiantes de Ingeniería de Materiales impartida por la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) con la asesoría de dos doctores. La parte teórica fue cubierta por una académica especializada en materiales de la UASLP y otro académico de la Universidad Panamericana (UP) en Guadalajara especializado en mecánica y dar soporte al manejo de equipo para pruebas.

Cabe mencionar que, este proyecto se implementó dentro de una asignatura de manufactura aditiva, esta materia se lleva de manera híbrida en una plataforma de Microsoft Teams. El titular es un profesor de la UASLP y el profesor invitado es de la UP. En la misma asignatura se incluye laboratorio, lo que permite alcanzar un proyecto vivencial a partir de los temas vistos en clases, como fue el caso de este trabajo de investigación aplicada.

Las probetas utilizadas fueron impresas con filamentos de la marca Hatchbox (Hatchbox®, 2665 Pomona Blvd. Pomona, CA, USA) con un diámetro de 1.75 mm. La Tabla 1 muestra las propiedades del material según el fabricante, es destacable la diferencia de propiedades que reportan los fabricantes del material con los datos obtenidos en pruebas, tal como lo reporta (Calignano et al., 2020).

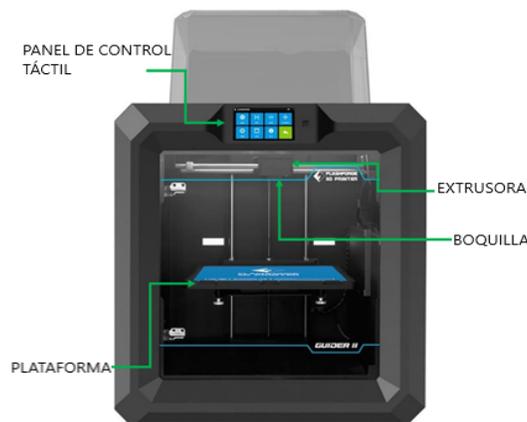
En la Tabla 1, se anexan los parámetros seleccionados para la impresión de probetas según el material. Las temperaturas fueron seleccionadas por la recomendación del software

FlashPrint y validados con el soporte técnico de la empresa que da apoyo a la impresora; asimismo, se validaron el resto de las variables de impresión. La máquina de impresión usada para la impresión de todas las probetas en este trabajo es una FlashForge Guider IIS mostrada en la Figura 1, donde se pueden ver las partes principales. La boquilla utilizada fue de 0.4 mm y el espesor de capa se fijó a 0.14 mm debido a que las piezas impresas presentan mayor resistencia mecánica a menor espesor de capa tal como lo describe Griffiths et al. (2016). Los parámetros de impresión se muestran también en la Tabla 1.

**Tabla 1.** *Propiedades de filamentos para impresión según los fabricantes*

Propiedades mecánicas e impresión para el PLA y PA12								
Propiedades mecánicas	Unidades	PLA	PA 12	Propiedades de impresión	Unidades	PLA	PA 12	
Módulo de elasticidad	de GPa	3.6	1.9	Temperatura extrusor	de °C	190 – 210	250 – 280	–
Elongación	%	29	210	Temperatura plataforma	de °C	50 – 60	80	
Fuerza de impacto	kN/m	7	12	Temperatura distorsión (HDT)	de °C	50	120	
Resistencia a la tensión (UTS)	MPa	60	45	Temperatura fusión	de °C	155	190	
Resistencia a la flexión	MPa	87	77.5	Velocidad Impresión	de mm/s	20 - 80	15 - 50	

**Figura 1.** *Vista general de la impresora 3D marca FlashForge modelo Guider IIS usada para impresión de probetas*



Con la finalidad de tener mayores datos de comparación se imprimieron probetas tipo 4 de acuerdo con la norma ASTM D638-14. Estas probetas fueron impresas por el método FDM con orientaciones de las capas a 0°/90° y 45°/-45° con relleno al 100% y fueron probadas a tensión a una velocidad de 5 mm/min a temperatura ambiente (Ver Tabla 2). Estas pruebas fueron realizadas en una máquina de esfuerzos de marca Shimadzu modelo AG-I con capacidad de 100 kN.

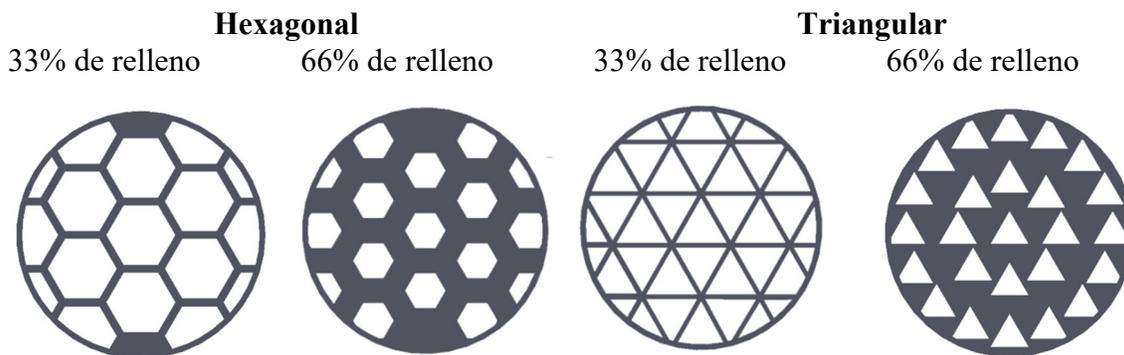
**Tabla 2.** *Parámetros de impresión en los materiales*

Parámetro	ENSAYO A TENSIÓN			ENSAYO A COMPRESIÓN		
	Unidades	Material		Unidades	Material	
Material	-	PLA	PA 12	-	PLA	PA 12
Relleno	%	100	100	-	Triangular	Hexagonal
Orientación en la deposición	Grados	0°/90°	0°/90°	%	33	66

El primer paso para obtener las probetas es dibujarlas en el software CAD llamado SolidWorks 2021 y ahí mismo generar el archivo \*.STL (Standard Tessellation Language) que requiere el software rebanador, o más conocido como “slicer”. Este archivo \*.STL puede ser leído por el “slicer” FlashPrint, ofrecido por el fabricante de la máquina impresora 3D. Estas variables impactan la calidad, tiempo y costo de la pieza final (Alafaghani et al., 2017), se decidió tomar los valores propuestos en el software de la máquina (variables no esenciales para este trabajo). El software rebanador o “slicer” es el encargado de generar el código G que controlará los movimientos del extrusor de la máquina, así como, de la cama para dar forma a la pieza física que pasará a pruebas. Se imprimen los cilindros que serán ensayados a compresión.

Al analizar las capacidades de impresión de la impresora 3D disponible para este trabajo se utiliza un arreglo triangular y hexagonal con 33% y 66% del área del círculo transversal del cilindro cubierto con material de PA12 y PLA (ver Figura 2).

**Figura 2.** *Esquema de los patrones tridimensionales en los cilindros utilizados en las pruebas de compresión*



De esta manera fueron generados ocho modelos; cuatro modelos de cada material, dos triangulares y dos hexagonales; uno al 33% y otro al 66%. Verdejo et al. (2020) investigaron la poliamida reforzada con fibra de carbono, comparando con distintas geometrías de impresión; entre ellas la triangular. En un trabajo reciente Podroužek et al. (2019) se inspiraron en patrones biológicos para impresión 3D, entre los que destacó, el patrón hexagonal, ya que su comportamiento bajo carga en compresión alcanza valores superiores a los 60 KN, con respecto de otros patrones utilizados.

Las pruebas de compresión se realizaron en la máquina marca United modelo TM-10 con capacidad de 10 toneladas; utilizando la norma ASTM 695, aplicando una relación de esbeltez de 2:1, de esta manera, el diámetro es la mitad de la altura del cilindro.

La velocidad de la prueba es 1.3 mm/min según la norma. Se utilizó también un micrómetro digital de la marca Mitutoyo modelo Absolute ID-C150EXB y celda de carga marca Entec con capacidad de 9 toneladas e indicador digital marca Cardinal. Con la finalidad de determinar las densidades se utilizó el método de medición de dimensiones, el cual consiste en cortar las muestras, a partir de las impresiones 3D, en figuras geométricas regulares, lo anterior para facilitar encontrar el volumen de estas, en este caso, para todas las figuras se utilizó una base rectangular y el mismo espesor para ello.

**RESULTADOS**

La Tabla 3 muestra los resultados de la resistencia de tensión última (UTS) y el módulo de elasticidad (E) para los filamentos de PLA y PA12. Los valores promedio de la UTS alcanzaron valores de 50 y 44 MPa para el PLA y PA12, respectivamente.

**Tabla 3.** Resultados de UTS y E para pruebas de tensión en filamentos

Muestra	Filamento			
	PLA		PA 12	
	UTS (MPa)	E (GPa)	UTS (MPa)	E (GPa)
1	50	2.2	44	1.5
2	51	2.3	45	1.7
3	49	2.1	43	1.5
Promedio	50	2.2	44	1.6
Desviación S.	1.0	0.1	1.0	0.1
UTS	Resistencia última a la tensión			
E	Módulo de elasticidad			

Cabe destacar que, ambos materiales presentan una baja variabilidad en los valores de UTS, lo que puede permitir una confiabilidad en los resultados obtenidos de los filamentos.

**Comportamiento a tensión en probetas impresas en 3D**

En la Tabla 4 se resume el comportamiento de las probetas impresas bajo la norma ASTM D638-14. Los ensayos fueron realizados por triplicado para garantizar resultados confiables, se determinó tanto el UTS como el módulo E para cada material. El efecto de la orientación de deposición de 0°/90° y 45°/-45° sobre la UTS para los dos materiales (PLA y PA12) y utilizando un porcentaje de relleno del 100%; además se decidió mantener el espesor de capa de 0.14 mm, ya que, se encontró un efecto positivo en el incremento de UTS cuando el espesor se disminuye (Griffiths et al., 2016). Cabe mencionar que, para la máquina FlashForge modelo Guider IIS, 0.14 mm es el espesor mínimo que puede procesar el extrusor. El efecto de la orientación de deposición de 0°/90° y 45°/-45° sobre la UTS para los dos materiales (PLA y PA12) y utilizando un porcentaje de relleno del 100% es mostrado en la Tabla 4.

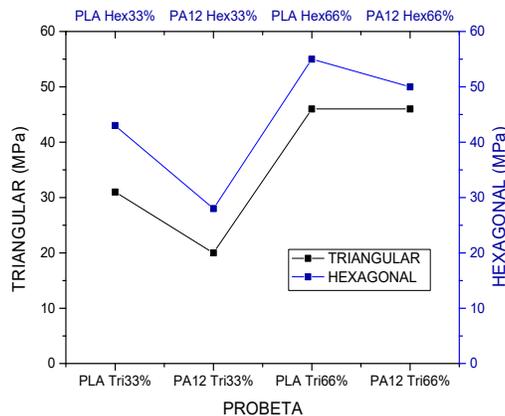
**Tabla 4.** Propiedades mecánicas del PLA y PA12 variando la orientación de deposición al 100% relleno

Muestra	Orientación en la deposición [0°/90°]				Orientación en la deposición [45°/-45°]			
	Relleno 100%				Relleno 100%			
	PLA		PA12		PLA		PA12	
	UTS (MPa)	E (GPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	UTS (MPa)	E (GPa)
1	53	1.9	43	1.4	56	1.9	47	1.6
2	55	2.0	45	1.3	58	1.95	47	1.7
3	55	1.8	42	1.4	60	2.1	48	1.4
Promedio	<b>54</b>	<b>1.9</b>	<b>43</b>	<b>1.4</b>	<b>58</b>	<b>2.0</b>	<b>47</b>	<b>1.6</b>
Desviación S.	<b>1.2</b>	<b>0.1</b>	<b>1.5</b>	<b>0.1</b>	<b>2.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>

**Comportamiento a compresión en probetas impresas en 3D**

El comportamiento de las probetas hexagonales es mucho mejor que el comportamiento en probetas triangulares (Ver figura 3). Los valores que se alcanzan en las probetas hexagonales varían desde 28 MPa para la probeta de PA12 con un 33% de relleno; hasta llegar al mejor comportamiento a compresión con 55 MPa en la probeta de PLA con un 66 % de relleno. Mientras que las probetas triangulares oscilan sus valores entre 20 MPa hasta un 46 MPa.

**Figura 3.** Esfuerzo último a compresión en probetas con rellenos triangulares y hexagonales con distintos porcentajes de relleno (33% y 66%)

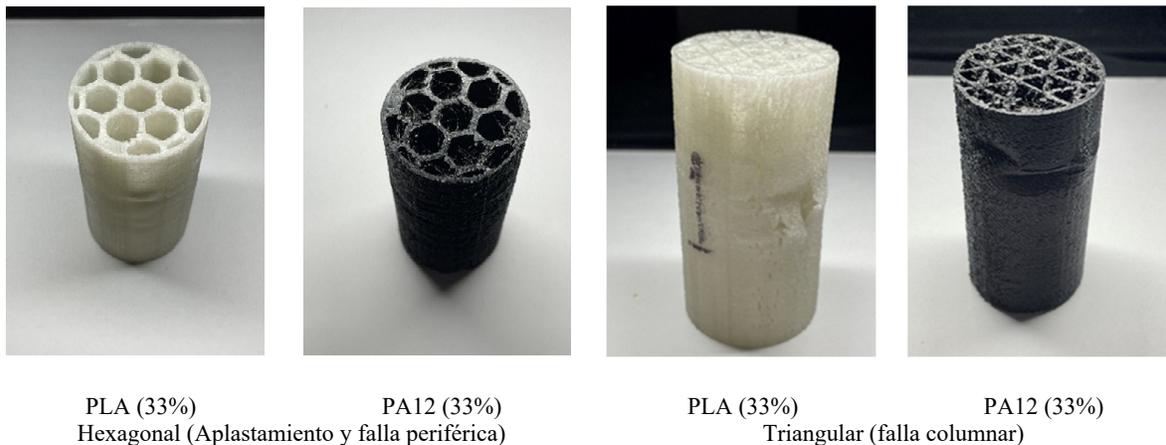


La visualización de la falla en ensayos estáticos permite entender en gran medida el mecanismo, por el cual, el material deja de funcionar durante la prueba y por supuesto predecir un comportamiento en su vida real. Así como, el mecanismo a la fatiga de los polímeros impresos con FDM es crucial para la evaluación de estos materiales en aplicaciones estructurales (Shanmugam et al., 2021).

En la Figura 4 se presentan fotografías a macro escala de probetas impresas por FDM con PLA y PA12, con forma hexagonal y triangular, todas con un 33% de relleno. Cabe mencionar que, las fallas más abruptas fueron presentadas con un 33% de relleno en comparación a las 66% de relleno, por la razón de la cantidad de área de trabajo, siendo 420

mm<sup>2</sup> y 872 mm<sup>2</sup>, respectivamente. El mecanismo de falla en las probetas con geometría triangular fue columnar. La falla se propago en la periferia de la probeta, concentrando la falla en una parte superficial externa. Este mecanismo fue similar tanto para el PLA como PA12. En contraposición de las probetas hexagonales no se observa directamente la falla. Con un mayor detalle la falla para la probeta de PLA fue por un aplastamiento, esto provocó que el porcentaje de reducción longitudinal es del 9 % en comparación a un 2% al promedio general de las probetas. La falla hexagonal de PA12 con un 33% de relleno fue provocado de manera sutil en la periferia.

**Figura 4.** *Falla en probetas impresas por FDM en PLA y PA12 con geometrías hexagonales y triangulares con un 33% de relleno*



En general, la falla más crítica se presenta en las probetas triangulares, esto se relaciona con el bajo desempeño a la compresión en estas probetas, en comparación a las probetas hexagonales. En el trabajo de Duraibabu et al. (2020) trabajaron con impresión FDM, empleando ABS, realizando ensayos a compresión bajo distintos arreglos tridimensionales: cubico, circular, triangular y hexagonal, mantenido el volumen de sección constante. El mejor desempeño frente a la compresión lo alcanzó la geometría hexagonal con 57 MPa y una energía de absorción de 27.6 Joules. Ellos concluyen que la absorción de energía de los EFG puede mejorarse mediante una modelización precisa de un gradiente de densidad y de la forma de los poros (Duraibabu et al., 2020).

## CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas en ensayos estáticos de piezas impresas por la técnica FDM de PLA y PA12. Se tomó como base los valores de UTS que alcanzan los filamentos de estos dos materiales. Se observó en las gráficas Esfuerzo-deformación en los filamentos presentaron un comportamiento dúctil en ambos materiales.

Con relación a las pruebas de compresión la estructura hexagonal presentó una mayor resistencia a la compresión de 55 MPa para la probeta de PLA con un 66% de relleno. En todos los casos la estructura hexagonal resulto ser más favorable que la triangular. Esto puede ser debido a la capacidad de absorción de energía que presenta los hexágonos que fue comprobado el trabajo presentado por Duraibabu et al. (2020). Las fallas fueron de tipo columnar para las probetas triangulares, sin distinción del material empleado.

Este proyecto de investigación trasciende por la participación de entidades académicas, con la colaboración de académicos y estudiantes en áreas de ingeniería de distintas universidades de México y comunicados por medio del uso de herramientas digitales como Microsoft Teams. Llevar a la realidad proyectos que resuelvan una necesidad tangible permite alcanzar el nivel cognitivo más elevado: la creación de nuevo conocimiento.

Se debe reconocer que el profesor es el punto de conexión para que el estudiante pueda ser activado por esta área del conocimiento y, a su vez, el estudiante logre un entendimiento de la propia naturaleza de la ciencia. Lograr que los propios educadores realicen ciencia a través de una investigación, le será más fácil transmitir esta conexión con los estudiantes (Eick & Reed, 2002). Se reconoce el apoyo que los estudiantes brindaron dentro de este proyecto de investigación, por lo que, dentro de este trabajo académico aparecen sus nombres como autores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzmán, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 791–803. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>
- Calignano, F., Lorusso, M., Roppolo, I., & Minetola, P. (2020). Investigation of the mechanical properties of a carbon fibre-reinforced nylon filament for 3D printing. *Machines*, 8(3), 52. <https://doi.org/10.3390/machines8030052>
- Calva, D., Granda, A. y Daquilema, B. (2018). La ciencia como medio para alcanzar el conocimiento científico. *Sociedad & Tecnología*, 1(1), pp. 38–48. <https://doi.org/10.51247/st.v1i1.83>
- Duraibabu, R., Prithvirajan, R., Sugavaneswaran, M., & Arumaikkannu, G. (2020). Compression behavior of functionally graded cellular materials fabricated with FDM. *Materialstoday: PROCEEDINGS*, vol. 24, pp. 1035–1041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.417>
- Eick, C., & Reed, C. (2002). What makes an inquiry-oriented science teacher? The influence of learning histories on student teacher role identity and practice. *Science Education*, 86(3), pp. 401–416. <https://doi.org/10.1002/sce.10020>
- El-Galy, I. M., Saleh, B. I., & Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences*, 1(1378). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1413-4>
- Elías, J. (2017). La dinámica de las publicaciones universitarias. Procesos editoriales de producción intelectual y de divulgación científica-cultural: el caso de Universidad del Magdalena. *Revista Jangwa Pana*, 16(1). <https://doi.org/10.21676/16574923.1992>
- Gonçalves, J., Lima, P., Krause, B., Pötschke, P., Lafont, U., Gomes, J., Abreu, C., Paiva, M., & Covas, J. (2018). Electrically conductive polyetheretherketone nanocomposite

filaments: from production to fused deposition modeling. *Polymers*, vol. 10(8), 925. <https://doi.org/10.3390/polym10080925>

Griffiths, C. A., Howarth, J., De Almeida-Rowbotham, G., Rees, A., & Kerton, R. (2016). A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, vol. 139(15), pp. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.182>

Hagopian, H. (2016). Experimentos en una ciencia no experimental. *Investigación Económica*, 75(295), pp. 31–91. <https://doi.org/10.1016/j.inveco.2016.03.002>

Martín, F. (2011). El plan estratégico de comunicación como nuevo modelo de investigación científica universitaria. *Correspondencias & Análisis*, (1), pp. 101–114. <https://doi.org/10.24265/cian.2011.n1.07>

Podroužek, J., Marcon, M., Ninčević, K., & Wan-Wendner, R. (2019). Bio-Inspired 3D infill patterns for additive manufacturing and structural applications. *Materials*, 12(3), 499. <https://doi.org/10.3390/ma12030499>

Shanmugam, V., Das, O., Babu, K., Marimuthu, U., Veerasimman, A., Johnson, D. J., Neisiany, R. E., Hedenqvist, M. S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2021). Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, vol. 143. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106007>

Verdejo, E., Coello, J., Martínez, A., Miguel, V., & Ayllón, J. (2020). Investigation of a short carbon fibre-reinforced polyamide and comparison of two manufacturing processes: fused deposition modelling (FDM) and polymer injection moulding (PIM). *Materials*, vol. 13(3), 672. <https://doi.org/10.3390/ma13030672>