

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA IMPRESORA ENDER 3-MAX USANDO FILAMENTO PLA CON INSERTOS DE CARBONO

Felipe Lazo-Rojas¹, Rodrigo Pérez-Ubeda²

¹Ingelab, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antofagasta, Chile. Email: felipe.lazo.rojas@ua.cl

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antofagasta, Chile. Email: rodrigo.perez.ubeda@uantof.cl

Resumen

Este estudio busca determinar los parámetros óptimos de operación para la impresión 3D con filamento de PLA reforzado con fibra de carbono en el laboratorio Ingelab3D de la Universidad de Antofagasta. Para definir estos parámetros, se desarrolló un plan de trabajo que incluyó el diseño de torres de temperatura y pruebas experimentales. A través de estos testeos, se identificaron los parámetros iniciales de impresión que mejoran la calidad de las piezas producidas. Se realizaron ensayos de tracción en probetas para determinar qué parámetros proporcionaban los mejores resultados mecánicos. Los resultados mostraron que los parámetros óptimos de impresión fueron una temperatura de 200°C, un 60% de relleno y un patrón lineal, los cuales entregaron las mejores propiedades mecánicas. Estos resultados se atribuyen a una mejor interacción a nivel molecular a esta temperatura, reduciendo la fragilidad del material y permitiendo una mayor elongación.

Palabras clave: Impresión 3D; manufactura aditiva; Fibra de carbono; PLA; Ensayo de tracción.

Abstract

This study aims to determine the optimal operating parameters for 3D printing with PLA filament reinforced with carbon fiber in the Ingelab3D laboratory at the University of Antofagasta. To define these parameters, a work plan was developed that included the design of temperature towers and experimental tests. Through these tests, the initial printing parameters that improve the quality of the produced pieces were identified. Tensile tests were conducted on specimens to determine which parameters provided the best mechanical results. The results showed that the optimal printing parameters were a temperature of 200°C, 60% infill, and a linear pattern, as they delivered the best mechanical properties. These results are attributed to better molecular-level interaction at this temperature, reducing the material's brittleness and allowing for greater elongation.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; Carbon fiber; PLA; Tensile testing.

1. Introducción

El diseño y manufactura de partes y piezas industriales se encuentra en continuo avance producto de la necesidad de desarrollar diseños cada vez más complejos para satisfacer las soluciones actuales [1]. Estos diseños complejos causan un encarecimiento de los procesos tradicionales de fabricación. Sin embargo,

en los últimos años, la manufactura aditiva ha emergido como una solución a la producción de prototipos y fabricación de piezas cada vez más complejas [2]. Por tanto, se pueden realizar piezas a un bajo costo, menor tiempo y con la posibilidad de realizar correcciones y mejora de los prototipos.

La manufactura aditiva se puede clasificar en diversas categorías, sin embargo, en este trabajo el estudio se centra en los procesos de impresión 3D. Este tipo de manufactura ha revolucionado la forma en que se diseñan y producen los objetos, debido a que, contrario a la fabricación tradicional como el torneado o fresado, este crea las piezas capa a capa adhiriendo el material de manera controlada. El método más común de fabricación aditiva por impresión 3D es conocido como modelado por deposición fundida o MDF [3]. Este proceso posee la capacidad de crear prototipos rápidamente y diseñar de manera más flexible.

Contar con un proceso de manufactura aditiva puede ser la mejor manera de agilizar el proceso de desarrollo y como consecuencia la producción. Los distintos tipos de manufactura aditiva dan solución a distintos problemas, además de que dentro de cada área existen distintos tipos de materiales con los cuales trabajar. Este es el objetivo de la presente investigación y estudio. Utilizando el proceso por deposición fundida como método de fabricación y un filamento PLA con fibra de carbono con propiedades mejoradas, como lo es su mayor dureza [4,5], se pueden determinar los mejores parámetros de impresión que permita aprovechar todas sus capacidades [6]. Esto hará posible obtener procedimientos que serán la guía para el Ingelab3D, de manera de asegurar impresiones de calidad y funcionales. Gracias a estos estudios se podrá utilizar el filamento para desarrollar productos que necesiten de una mayor resistencia y menor transferencia térmica.

2. Metodología

Para el inicio de este estudio se deben revisar los parámetros del fabricante, y determinar si es posible utilizar el filamento como se indica. En primera instancia el fabricante menciona que la temperatura debe oscilar entre los 240 y 280 °C, esto se llevó a cabo en la plataforma Ender 3 MAX como se ve en la Figura 1, una vez verificada esta temperatura se plantea una torre de temperatura como se muestra en la Figura 2. En total se realizaron 3 torres de temperatura. La primera torre realizada con los parámetros del fabricante no dio resultados positivos, la calidad de impresión no era la adecuada además de existir poca adherencia entre capas. En la segunda y tercera torre se cambiaron estos parámetros hasta llegar a las temperaturas de 190° y 200 °C. Una vez determinada esta temperatura se buscó definir la retracción del filamento, función que permite liberar presión en la boquilla antes de realizar un movimiento discontinuo, para lo cual se utilizó una torre de retracción, esta prueba arrojó que 5 mm de retracción era el ideal para los ensayos realizados.

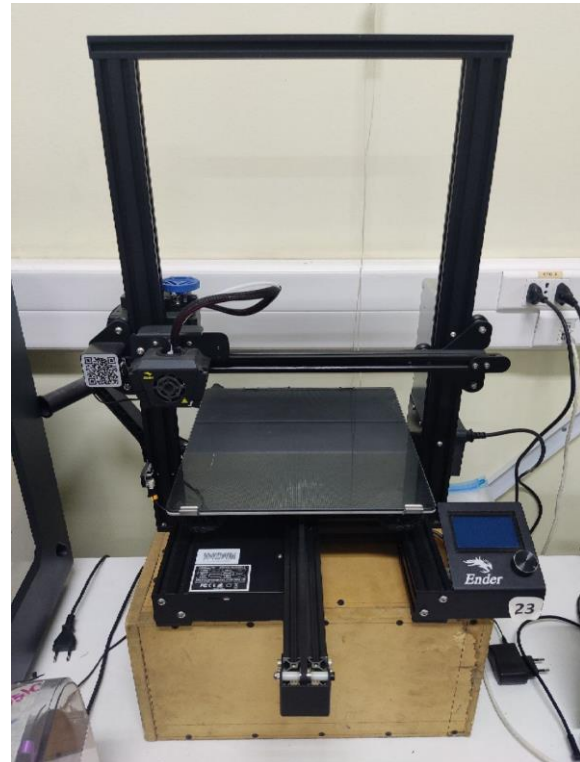


Figura 1. Plataforma de impresión para los ensayos.

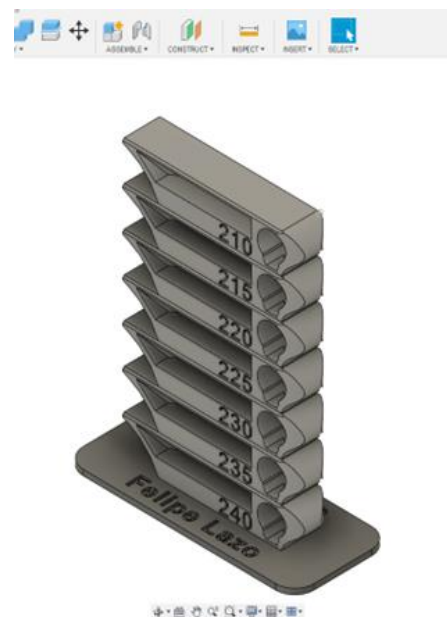


Figura 2. Torre de temperatura 2 diseño en Fusion 360.
Fuente: elaboración propia.

Con estos datos se definió el diseño experimental, el cual considera la impresión de probetas de tracción con distintos parámetros para encontrar las mejores condiciones de impresión. Para cada parámetro se utilizaron dos límites, uno superior y uno inferior. En la Tabla 1 se muestran los parámetros a ser analizados; el porcentaje de relleno, el cual es uno de los

parámetros principales que se utilizan para aumentar la densidad de las piezas, la temperatura, para saber si es un factor de alta influencia dentro de los resultados, y el tipo de relleno, que es el que modifica la morfología interna de los diseños que se pueden fabricar con esta técnica.

Tabla 1. Diseño experimental de probetas con límites inferiores y superiores.

Ensayo	Unidades [Und]	Temperatura [°C]	Porcentaje de relleno [%]	Forma del relleno	Tiempo de impresión
1	4	200	60	Lineal	4Hr 5Min
2	4	200	60	Tri-hexagonal	3Hr 58 min
3	4	200	20	Lineal	3Hr 24min.
4	4	200	20	Tri-hexagonal	3Hr 21min.
5	4	190	60	Lineal	4Hr 5min
6	4	190	60	Tri-hexagonal	3Hr 58min
7	4	190	20	Lineal	3Hr 24min
8	4	190	20	Tri-hexagonal	3Hr 21min

Fuente: Elaboración propia.

Luego de imprimir todas las probetas y mantenerlas en bolsas al vacío para conservar sus propiedades y que no absorban humedad, se realizan los ensayos de tracción, con una máquina universal Zeick Roell Z 0.5, la que permite registrar los datos de cada ensayo. Estos datos son posteriormente utilizados para determinar la probeta con las mejores propiedades mecánicas.

Para discutir los resultados primero se utilizó un análisis de varianza ANOVA de tres factores que permite ver como las variables temperatura, porcentaje de relleno y tipo de relleno influyen sobre las propiedades mecánicas de las probetas impresas con filamento PLA-CF. Estos factores son las variables dentro del estudio, por otra parte, los parámetros fijos son la temperatura de la cama, el diámetro de la boquilla de 0.4 mm, retracción del filamento de 5 mm, altura de capa de 0.12 mm y finalmente velocidad de impresión de 150 mm/s.

Las variables independientes que caracterizan este estudio son el módulo de elasticidad E , esfuerzo de fluencia S_y , deformación en el punto máximo ε_M , resistencia en el punto de rotura S_B , deformación en el punto de rotura ε_B y tenacidad T . Los resultados son sometidos a análisis comparativo para definir cuál de los factores tiene una influencia más significancia en cada una de las variables. Esta significancia está representada por el 95% de confiabilidad ($p < 0.05$) [7].

3. Resultados.

La influencia de los parámetros de impresión se ven reflejados en los ensayos de tracción de las probetas. El análisis de estos resultados y la discusión se disponen en distintas tablas, las cuales se muestran en las siguientes secciones.

3.1. Medias y desviaciones estándar para las propiedades del PLA-CF

En la Tabla 2, se muestra la media aritmética y la desviación estándar para las variables: módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia y deformación en el punto máximo para cada caso de combinación producida por las modificaciones en los parámetros de impresión.

Tabla 2. Media y desviación estándar de los datos para el módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia y deformación en el punto máximo.

	Temperatura	Porcentaje de relleno	Tipo de relleno	Media	Desviación
E	190	20%	Lineal	2151.425	286.256
			Tri	2078.375	123.721
		60%	Lineal	2450.675	474.536
			Tri	2638.725	106.254
	200	20%	Lineal	1657.725	43.894
			Tri	1924.400	54.136
		60%	Lineal	2048.400	183.362
			Tri	2042.800	42.884
S_y	190	20%	Lineal	22.225	0.199
			Tri	24.274	0.263
		60%	Lineal	29.759	0.453
			Tri	27.842	1.506
	200	20%	Lineal	26.865	0.331
			Tri	27.523	0.176
		60%	Lineal	31.346	0.554
			Tri	29.742	0.416
ε_M	190	20%	Lineal	0.017	0.001
			Tri	0.016	0.001
		60%	Lineal	0.018	0.001
			Tri	0.018	0.002
	200	20%	Lineal	0.024	0.003
			Tri	0.022	0.000
		60%	Lineal	0.023	0.001
			Tri	0.021	0.000

Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia se puede destacar la alta desviación estándar que posee el módulo de elasticidad. Esto se debe principalmente a la difícil determinación de la zona elástica. Esta desviación es menor cuando se utiliza un tipo de relleno tri-hexagonal y a una temperatura de 200°C, lo que permite inferir que con estos parámetros el proceso de impresión es más consistente. Los resultados de la deformación en su punto máximo muestran menor variabilidad en los datos para los casos estudiado.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las variables: la resistencia a la rotura, la deformación en el punto de rotura y la tenacidad.

Tabla 3. Medias y desviaciones estándar para la resistencia en el punto de rotura, deformación en el punto de rotura y tenacidad.

	Temperatura	Porcentaje de relleno	Tipo de relleno	Media	Desviación
S_B	190	20%	Lineal	15.092	1.345
			Tri	17.456	3.950
		60%	Lineal	16.460	5.570
			Tri	22.613	4.676
	200	20%	Lineal	22.239	0.809
			Tri	25.263	1.661
		60%	Lineal	27.397	0.589
			Tri	26.826	0.560
ε_B	190	20%	Lineal	0.033	0.005
			Tri	0.021	0.005
		60%	Lineal	0.038	0.004
			Tri	0.024	0.004
	200	20%	Lineal	0.031	0.004
			Tri	0.027	0.003
		60%	Lineal	0.032	0.003
			Tri	0.027	0.003
T	190	20%	Lineal	1112.988	200.924
			Tri	677.703	203.746
		60%	Lineal	1577.319	196.959
			Tri	953.165	258.002
	200	20%	Lineal	1173.228	206.167
			Tri	978.013	172.383
		60%	Lineal	1425.686	177.960
			Tri	1113.945	178.152

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados de la resistencia a la rotura se puede apreciar una menor desviación cuando se utiliza el tipo de relleno tri-hexagonal. Por otra parte, los ensayos con menor temperatura poseen una resistencia menor, lo

que podría ser causado por la falta de fusión entre las pasadas del filamento. El conjunto de resultados presenta poca variabilidad para la deformación en el punto de rotura. Por último, en el caso de la tenacidad, se observa una gran variabilidad, esto puede ser debido a que la tenacidad es dependiente de las variables de relleno y tipo de relleno, donde ambas variables influyen directamente en la densidad de las probetas.

3.2. Efecto de las variables en las propiedades del PLA-CF.

Para analizar el efecto de la temperatura se eligieron dos límites, 190°C y 200°C. El efecto de esta dentro del diseño experimental se puede ver en la Tabla 4, donde la temperatura tiene una influencia estadísticamente significativa en el módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, la deformación en su punto máximo y su resistencia en el punto de rotura.

Tabla 4. Efectos inter-sujetos en la temperatura.

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Origen		gl	Media cuadrática	F	Sig.
Temperatura	E	1	1354452.258	28.969	0.000
	S_y	1	64.691	161.623	0.000
	ε_M	1	0.000	131.907	0.000
	S_B	1	453.129	48.743	0.000
	ε_B	1	8.024E-07	0.050	0.825
	T	1	68337.839	1.693	0.206

Fuente: Elaboración propia.

La influencia de la temperatura en estos puntos indica que los átomos del filamento tienen una mejor interacción a mayor temperatura, lo cual afecta directamente a las propiedades físicas de las impresiones obteniéndose mejores resultados. Por esta razón es importante determinar la temperatura de operación correcta para el filamento. Como se demostró, los parámetros del fabricante pueden no ser los ideales debido a los cambios climáticos del entorno, además del tipo de impresora que se utiliza.

Las variaciones producidas por el porcentaje de relleno afectan en la densidad de las probetas, produciendo una influencia significativa en los parámetros de módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, resistencia en el punto de rotura y la tenacidad, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Efectos inter-sujetos para el porcentaje de relleno.

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Origen		gl	Media cuadrática	F	Sig.
% de relleno	E	1	936635.628	20.033	0.000
	S_y	1	158.450	395.872	0.000
	ε_M	1	2.39E-04	0.142	0.709
	S_B	1	87.728	9.437	0.005
	ε_B	1	3.85E-02	2.407	0.134
	T	1	636397.224	15.769	0.001

Fuente: Elaboración propia.

La influencia en el módulo de elasticidad se debe a que al aumentar el porcentaje de relleno permite que existan más partículas de material, esto aumenta la rigidez, por lo cual la probeta es menos propensa a deformarse bajo las cargas que experimenta. Para el esfuerzo de fluencia, el aumento de material incrementa la resistencia a la deformación plástica, lo que resulta en el aumento del esfuerzo de fluencia. En el caso de la resistencia en el punto de rotura, la existencia de más material permite frenar la aparición de grietas, produciendo que la fuerza se distribuya de manera más homogénea. Por último, en el caso de la tenacidad, como existe más material, se permite que la probeta absorba más energía.

La influencia del patrón de relleno es más significativa en la deformación en su punto máximo, resistencia en el punto de rotura, deformación en el punto de rotura y en la tenacidad, como se ve en la Tabla 6.

Tabla 6. Efectos inter-sujetos para el patrón de relleno.

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Origen		gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tipo de relleno	E	1	70716.203	1.512	0.231
	S_y	1	0.331	0.828	0.372
	ε_M	1	1.73E-02	10.325	0.004
	S_B	1	60.158	6.471	0.018
	ε_B	1	0.001	41.485	0.000
	T	1	1226797.111	30.397	0.000

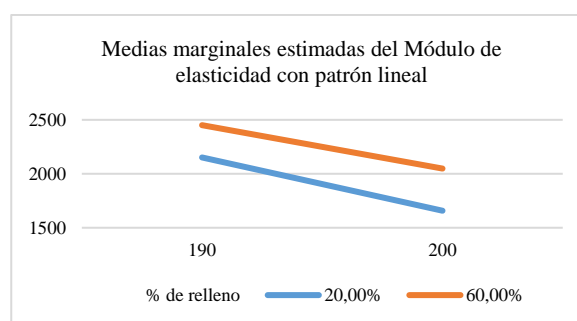
Fuente: Elaboración propia.

La diferencia de los patrones produce que con un patrón exista mayor homogeneidad en la probeta, esto permite que el patrón de impresión influya directamente en la tenacidad, donde dependiendo del tipo de relleno se permite retardar la aparición de grietas, o mejorar la capacidad para almacenar energía sin romperse. Para este caso, el tipo de relleno lineal muestra mejores capacidades de distribución y almacenaje de energía, ya que, produce una probeta homogénea.

Para el estudio de interacción entre parámetros en primera instancia, en la interacción entre temperatura y porcentaje de relleno, se ven influencias solo en el esfuerzo de fluencia, esto quiere decir que al modificar estos parámetros se influye en la fuerza máxima que puede resistir el material. En el caso de la interacción entre la temperatura y tipo de relleno solo tiene influencia significativa sobre la resistencia en el punto de rotura, es decir que mejora la capacidad de recibir energía y el movimiento de este dentro de la estructura. Por último, la interacción del porcentaje de relleno y tipo de relleno tiene influencia significativa solo en la variable esfuerzo de fluencia, producto de una mayor homogeneidad de su estructura y la cantidad de material.

3.3. Estudio de la interacción de las variables en las propiedades del material.

En la Figura 3 y 4 se muestran los resultados para el módulo de elasticidad cuando se trabaja con un tipo de patrón lineal y un tipo de patrón tri-hexagonal, respectivamente. Se observa que a medida que aumenta la temperatura, disminuye el módulo de elasticidad. De igual manera, el módulo disminuye cuando se utiliza un porcentaje de relleno mayor.

**Figura 3.** Gráfico del módulo de elasticidad para cada uno de los parámetros con patrón lineal.

El efecto de una mayor temperatura puede estar afectando la fluidez la distribución de las fibras de carbono dentro del material impreso. Por su parte un aumento en el porcentaje de relleno implica mayor densidad del material, lo que podría ocasionar tensiones internas durante el enfriamiento y solidificación de la pieza.

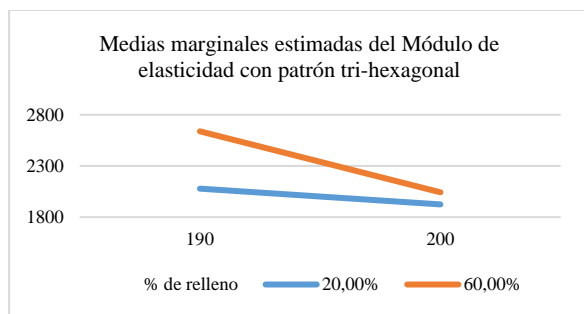


Figura 4. Gráfico del módulo de elasticidad para cada uno de los parámetros con patrón tri-hexagonal.

Para el caso de la resistencia máxima existe un aumento de esta cuando aumenta la temperatura y el porcentaje de relleno mientras que el tipo de relleno no parece influenciar, tal como se muestra en las Figuras 5 y Figura 6.

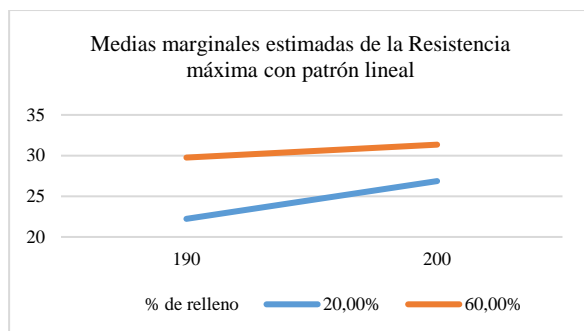


Figura 5. Gráfico de la Resistencia máxima para cada uno de los parámetros con patrón lineal.

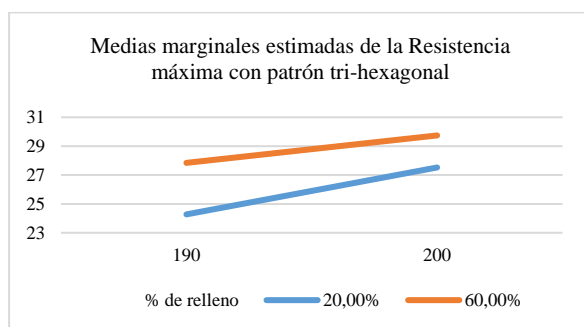


Figura 6. Gráfico de la Resistencia máxima para cada uno de los parámetros con patrón Tri-hexagonal.

La mejora de la resistencia máxima a mayor temperatura y porcentaje de relleno es debido a que existe mayor cantidad de material, además a mayor temperatura existe una mejor adherencia de las capas de impresión evitando así delaminaciones.

Los resultados de la deformación en su punto máximo se pueden observar en las Figuras 7 y 8. Al aumentar la temperatura se produce un aumento de la deformación. Esta variable está muy relacionada con la resistencia máxima, ya que a mayor temperatura se produce una

mayor capacidad de deformación producto de que el material posee una mayor fluidez, lo que estaría relacionado con la baja del módulo de elasticidad. En el caso del porcentaje de relleno, no se observa un cambio significativo.

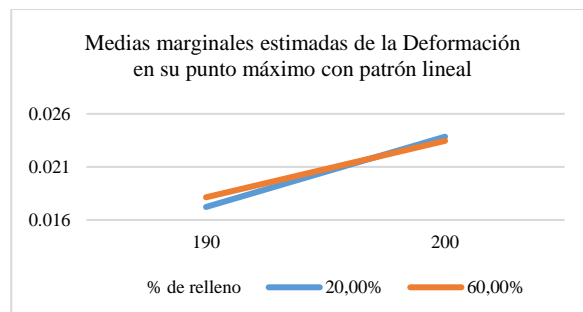


Figura 7. Gráfico de la deformación en el punto máximo para cada uno de los parámetros con patrón lineal.

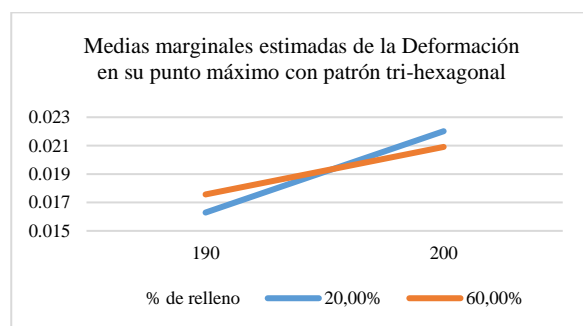


Figura 8. Gráfico de la deformación en el punto máximo para cada uno de los parámetros con patrón tri-hexagonal.

En el caso de la resistencia en el punto de rotura se puede observar un incremento de esta cuando mayor es la temperatura y mayor es el porcentaje de relleno, Figuras 9 y 10. Este fenómeno se debe al cambio estructural interno que mejora la interacción entre sus átomos, lo que significa que a mayor temperatura se permite mayor deformación, por el contrario, a menor temperatura existe una mayor fragilidad producto de la baja cohesión entre las capas.

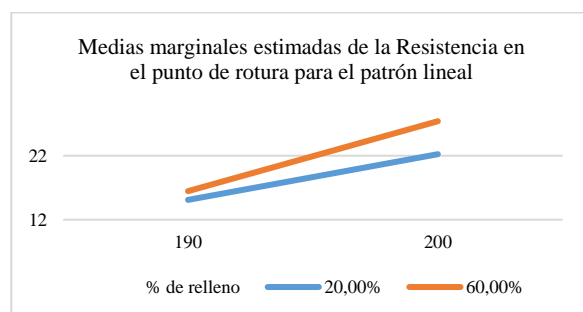


Figura 9. Gráfico de la Resistencia en el punto de rotura para cada uno de los parámetros con patrón lineal.

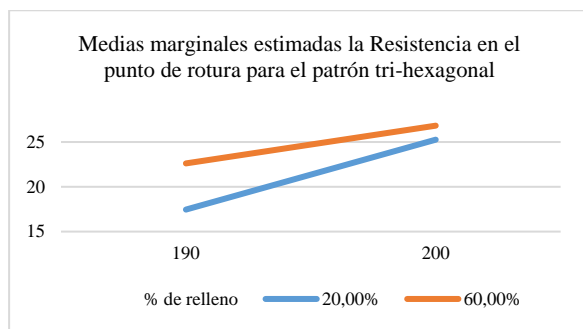


Figura 10. Gráfico de la Resistencia en el punto de rotura para cada uno de los parámetros con patrón tri-hexagonal.

Para la deformación en su punto de rotura en el patrón lineal, Figura 11, se obtienen valores mayores para menor temperatura, esto podría deberse a que a menor temperatura existe una mala adhesión, las capas individuales pueden deslizarse o separarse más fácilmente bajo carga, lo que permite una mayor deformación antes de que se produzca la rotura.

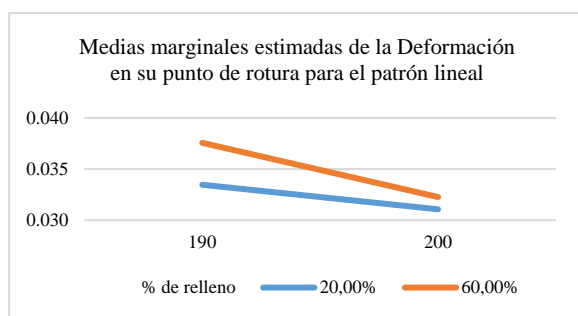


Figura 11. Gráfico de la deformación en el punto de rotura para cada uno de los parámetros con patrón lineal.

Por el contrario, en la Figura 12, se puede observar los resultados para el patrón tri-hexagonal, en donde a temperaturas más altas, el patrón tri-hexagonal puede ser más uniforme y consistente, permitiendo una distribución de cargas más eficiente y una mayor capacidad de deformación.

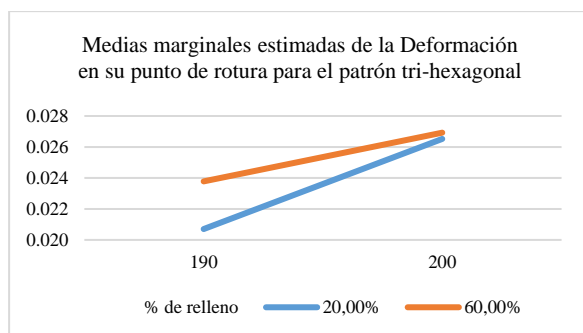


Figura 12. Gráfico de la resistencia en su punto de rotura para cada uno de los parámetros con patrón tri-hexagonal.

Por último, en las Figuras 13 y 14 se observan los resultados para la tenacidad, en donde se puede

apreciar que esta se correlaciona totalmente con la deformación al punto de rotura ya que una mayor deformación estaría asociada a una mayor absorción de energía. Adicionalmente se puede observar que la tenacidad se ve influenciada por el tipo de relleno. En el caso del relleno lineal, este puede proporcionar una buena combinación de resistencia y flexibilidad, dependiendo del porcentaje de relleno. En cambio, el relleno Tri-hexagonal posee una mayor capacidad para distribuir las cargas de manera eficiente, lo que puede mejorar la tenacidad, especialmente a porcentajes de relleno más altos.

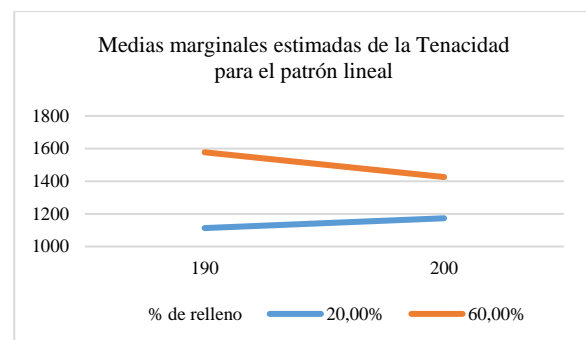


Figura 13. Gráfico de la tenacidad para cada uno de los parámetros con patrón lineal.

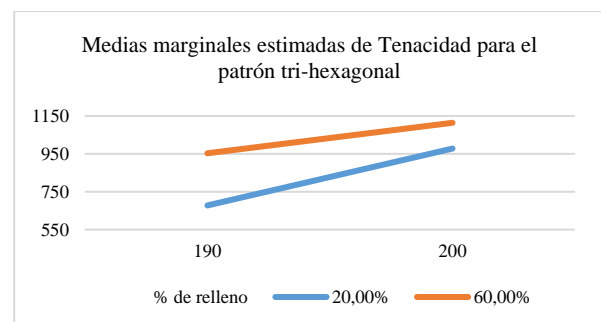


Figura 14. Gráfico de la tenacidad para cada uno de los parámetros con patrón tri hexagonal.

Es importante destacar que cuanto mayor sea la temperatura en probeta con patrón tri-hexagonal, se producía un fenómeno de delaminación, ya que las probetas no tenían una fractura continua si no que lo hacían en distintas partes, o se despegaban sus capas, como se muestra en la Figura 15.

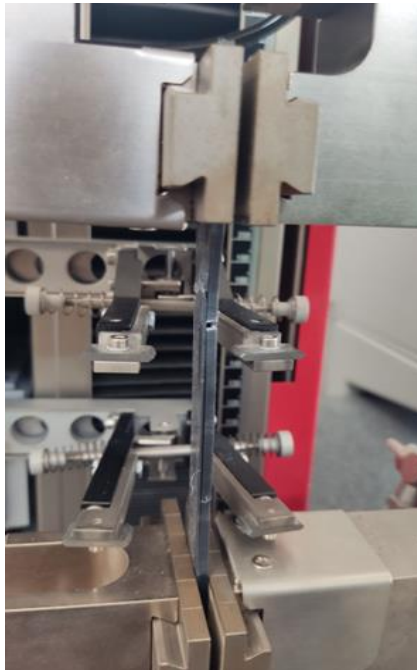


Figura 15. Falla en probeta sometida a tracción.

Por ende, los resultados de tenacidad se ven afectados por este fenómeno, el cual deberá ser estudiado en el futuro.

4. Conclusión.

Para temperatura de impresión de 200°C, se obtienen los mejores resultados en términos de adherencia entre capas, lo que permite que exista una mejora en la calidad de impresión bajo las fuerzas a la que fue sometida la pieza. Estas características fueron contrarias a menor temperatura para la mayoría de las propiedades mecánicas estudiadas.

El tipo de relleno lineal entrega mejores características ligadas a la densidad del material, debido a que cuando no existe una continuidad dentro de la forma de la impresión, crea grietas que pueden inducir a la falla del material prematuramente, además que crea una mala adherencia entre las capas que no son iguales. Esto puede cambiarse dentro de los parámetros de impresión para que dentro de todas sus capas sea una misma morfología.

Con el porcentaje de relleno se puede apreciar una diferencia en la cantidad de energía que puede absorber la pieza antes de la fractura, ligado a que también hay mayor cantidad de material para absorber esta energía. Sin embargo, se debe resaltar que dependiendo de la combinación entre la cantidad de material y la velocidad de enfriamiento se pueden producir esfuerzos residuales que afectarían negativamente las propiedades mecánicas de la pieza.

Para futuros trabajos con el filamento PLA+CF sería interesante continuar con otros estudios mecánicos del material, para obtener una mejor caracterización. Además, sería interesante estudiar si los parámetros de impresión afectan en la morfología interna de cada línea de impresión, es decir, si existen poros o burbujas de aire a distintos parámetros o si estos aumentan ligados a ciertas condiciones.

5. Referencias.

- [1] ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary <https://www.iso.org/standard/74514.html>
- [2] Lamikiz Mentxaka, A. (Coord.), Camacho López, A. M. (Coord.) y Ferrándiz Bou, S. (Coord.) (2023). *Fabricación Aditiva: (1 ed.)*. UNED Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/uantof/246705?page=24>.
- [3] Gómez González, S. (2016). *Impresión 3D, 1ª edición*. MARCOMBO EDICIONES TECNICAS. ISBN 9788426727121
- [4] Bochnia, J., Blasiak, M., & Kozior, T. (2021). A comparative study of the mechanical properties of fdm 3d prints made of pla and carbon fiber-reinforced pla for thin-walled applications. *Materials*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/ma14227062>
- [5] S. Valvez, P. Santos, J.M. Parente, M.P. Silva, P.N.B. Reis, 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites: A short review, *Procedia Structural Integrity*, Volume 25, 2020, Pages 394-399, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.056>.
- [6] Águila Perea, J. (2022). Estudio mecánico de la resistencia de probetas fabricadas mediante impresión 3D con fibra de vidrio y nylon reforzado con fibra de carbono. Trabajo Final de Grado, Universidad de Jaén, España.
- [7] Ubeda, R. P., Gutiérrez Rubert, S. C., Stanisic, R. Z., Perles Ivars, Á. (2021). Behavioral Study of the Force Control Loop Used in a Collaborative Robot for Sanding Materials. *Materials*, 14, 67. <https://dx.doi.org/10.3390/ma14010067>