

Efecto de los parámetros de impresión 3D en la resistencia mecánica del ABS

Flor Yanhira Rentería-Baltierrez¹, Jesús Gabino Puente-Córdova²,
Pedro Inés Loera-Martínez¹, Arlethe Yari Aguilar-Villarreal¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

flor.renteriabltz@uanl.edu.mx, jesus.puentecr@uanl.edu.mx, pedro.loeramr@uanl.edu.mx, arlethe.aguilarrvll@uanl.edu.mx

RESUMEN

Dado el continuo avance de la tecnología de impresión 3D y el creciente interés en desarrollar prototipos o productos con propiedades mejoradas, este estudio se centra en la evaluación de las propiedades mecánicas del acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Se fabricaron probetas de ABS bajo diferentes condiciones de impresión, las cuales fueron evaluadas mediante un diseño de experimentos y ensayos de tensión para identificar los parámetros óptimos que maximizan la resistencia a la tensión del material. Adicionalmente, se realizó un análisis mecánico dinámico (DMA) para la probeta con mejores condiciones de impresión, evaluando su comportamiento viscoelástico en función de la temperatura. Los resultados del DMA muestran una temperatura de transición vítrea alrededor de 123°C, indicando la máxima disipación de energía. Por encima de los 160°C, el material mostró un comportamiento viscoso asociado al inicio del flujo, información clave para optimizar procesos como la inyección, extrusión e impresión 3D. Este enfoque integral combina técnicas de caracterización mecánica y viscoelástica, permitiendo establecer una relación entre los parámetros de impresión y el desempeño del ABS, contribuyendo al diseño eficiente de procesos y aplicaciones.

PALABRAS CLAVE

Impresión 3D, ABS, propiedades mecánicas, diseño de experimentos.

ABSTRACT

The continuous advancement of 3D printing technology and the growing interest in developing prototypes or products with enhanced properties have driven this study, which focuses on evaluating the mechanical properties of acrylonitrile butadiene styrene (ABS). ABS specimens were fabricated under different printing conditions, which were assessed through a design of experiments and tensile tests to identify the optimal parameters that maximize the material's tensile strength. Additionally, dynamic mechanical analysis (DMA) was performed on the sample with the best printing conditions, evaluating its viscoelastic behavior as a function of temperature. The DMA results identified a glass transition temperature around 123°C, indicating the maximum energy dissipation. Above 160°C, the material exhibited a viscous behavior associated with the onset of flow, providing key information for optimizing processes such as injection molding, extrusion, and 3D printing. This integrated approach combines mechanical and viscoelastic characterization techniques to provide valuable insights into the relationship between printing parameters and the performance of ABS, contributing to the efficient design of processes and applications.

KEYWORDS

3D printing, ABS, mechanical properties, design of experiments.

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D, la cual forma parte de la manufactura aditiva, es una tecnología que ha hecho posible el desarrollo de estructuras complejas a partir de un diseño o modelo computacional con el cual se obtiene un elemento sólido.¹ La técnica de impresión 3D ha sido utilizada en diversas aplicaciones y desarrollos tecnológicos ya que, a diferencia de técnicas como el mecanizado de arranque por viruta, la manufactura aditiva permite crear prototipos rápidos y personalizados con alta precisión, evitando el uso de diversas herramientas y el desperdicio de material.²

Por lo anterior, un área que se encuentra en crecimiento e investigación es el desarrollo de nuevos procesos de producción que optimicen los recursos de materia prima, y además brinden la facilidad de obtener objetos con diseño libre partiendo de un modelo digital computarizado.³ Sin embargo, en la manufactura aditiva se han reportado algunas desventajas como las relacionadas a la fusión deficiente y el comportamiento anisotrópico debido a problemas de adhesión que resulta en defectos entre capas durante la impresión. Para mejorar el rendimiento de las piezas impresas en 3D, se ha estudiado la selección de parámetros de impresión 3D.⁴ Entre los más comunes se encuentran la altura de la capa, la temperatura de extrusión, velocidad de alimentación, el patrón de relleno, la orientación de la pieza y la dirección de extrusión. El comportamiento mecánico y calidad del material impreso estará en función de la selección y combinación de los parámetros establecidos en el equipo de impresión 3D. Entre las diferentes tecnologías de manufactura aditiva, el modelado por deposición fundida (FDM) es la técnica más popular y versátil en la que se utiliza un filamento termoplástico como materia prima, el cual pasa a través de una extrusora donde se funde y se deposita capa por capa en una plataforma, solidificándose para formar un objeto 3D.⁵

La manufactura mediante tecnología tipo FDM ha sido objeto de investigación para abordar el comportamiento mecánico de los materiales impresos, ya que las propiedades mecánicas del material procesado con esta tecnología difieren de las propiedades de la materia prima.⁶ Por un lado, las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D disminuyen en comparación con las procesadas de manera tradicional, como lo es inyección o extrusión. Por otro lado, si las capas de impresión se fusionan correctamente, se obtienen resultados aceptables. Sin embargo, el carácter heterogéneo obtenido durante la impresión genera un rendimiento mecánico sensible a la orientación de la impresión, lo que determina la distribución de los defectos.

Se han reportado resultados de “*air gap*” los cuales hacen referencia al espacio entre dos filamentos adyacentes.⁷ Cuando el *air gap* es positivo significa que dos filamentos consecutivos no tienen contacto y por lo tanto hay presencia de huecos. Si este valor es negativo, indica que hay un mejor relleno y esto aumentará la resistencia a tensión, la densidad, y por tanto la resistencia de las uniones.⁸ Sin embargo, es importante considerar que un exceso de material conlleva a un mal acabado, o incluso que los filamentos adyacentes presenten deformaciones o distorsión. En cuanto a la dirección de extrusión del filamento se ha reportado que las piezas fabricadas presentan mayor resistencia cuando la impresión se fija en la dirección de extrusión del filamento. Esta diferencia de propiedades según la dirección es lo que se conoce como anisotropía.⁹ En la altura de capas ha sido posible observar, en el eje vertical, un efecto escalera en las geometrías curvas. Este es un factor importante en la rugosidad y acabado superficial. A menor altura de capa, menor rugosidad y mejor acabado superficial, lo que conlleva a mayor tiempo de fabricación.¹⁰

La historia térmica del material juega un papel fundamental en la calidad de las uniones. La calidad de la unión dependerá de la formación de un cuello de unión entre dos filamentos adyacentes y de la difusión de las cadenas poliméricas a través de la unión. Los patrones de relleno afectan la resistencia de las piezas debido a que el relleno impacta la orientación del filamento. Los patrones de relleno más utilizados suelen ser el rectangular y el panal de abeja (*honeycomb*). Los efectos de la orientación en el rendimiento mecánico de las piezas FDM se han estudiado previamente.¹¹ Los autores coinciden en que la orientación de impresión más fuerte se obtiene cuando la deposición del filamento fusionado coincide con la dirección de tensión. Sin embargo, se puede encontrar una variedad de orientaciones a lo largo de esta dirección de tensión, que no han sido analizadas en otros estudios.

Los materiales poliméricos más empleados para el proceso de impresión 3D son el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA), nylon, policarbonato (PC), poliuretano termoplástico

(TPU) y el politereftalato de etilenglicol (PET).¹² Además, es posible el empleo de ciertos aditivos que provoquen variabilidad en las capacidades y propiedades mecánicas y térmicas. El ABS es un copolímero termoplástico que surge por la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno. Las porciones pueden variar del 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno.¹³ El ABS es un material amorfo, es decir que no tiene temperatura de fusión verdadera y esta se encuentra en un rango de 220 a 240°C, y presenta buenas propiedades mecánicas haciéndolo uno de los materiales más utilizados por la tecnología de manufactura aditiva.

Dado que resulta imprescindible conocer las propiedades de los productos obtenidos mediante este proceso, uno de los ensayos que permiten conocer su esfuerzo máximo es el ensayo de tensión.¹⁴ Al realizar un análisis estadístico con los diferentes materiales y sus niveles de densidad, se puede llegar a determinar las condiciones óptimas y la variabilidad existente en los datos obtenidos del ensayo de tensión.¹⁵ En investigaciones previas, se han empleado métodos estadísticos como Taguchi y ANOVA para analizar cómo los parámetros de impresión influyen en las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante FDM.¹⁶ Existe una amplia cantidad de datos en la literatura que exploran el rendimiento mecánico, las configuraciones de impresión y las estrategias de optimización aplicadas a componentes producidos mediante impresión 3D.^{17,18}

Este trabajo se centra en evaluar la resistencia máxima de probetas de ABS impresas bajo diferentes condiciones de patrón de relleno, resolución y orientación de impresión. A través del método Taguchi, se identifican los efectos individuales y combinados de los parámetros del proceso, determinando las condiciones óptimas para maximizar las propiedades mecánicas. Adicionalmente, se realizaron ensayos de análisis mecánico dinámico (DMA) para caracterizar el comportamiento viscoelástico de las probetas y comprender de manera más profunda las interacciones entre los parámetros de impresión y las propiedades dinámicas de los materiales. Los hallazgos de este estudio ofrecen una valiosa contribución para optimizar los procesos de impresión 3D del ABS, proporcionando una base sólida para el diseño de condiciones de procesamiento específicas. Además, estos resultados permiten una selección informada de los parámetros de impresión en función del campo de aplicación, promoviendo un enfoque más eficiente y personalizado en la fabricación aditiva.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Material y preparación de probetas

El material utilizado en este estudio es ABS de color verde neón, con dimensiones de 50 × 7 × 3 mm, seleccionado para evaluar las condiciones óptimas del proceso de impresión 3D. El filamento de ABS fue empleado tal como se recibió del proveedor 3D Systems, sin modificaciones adicionales. El diseño de las probetas fue desarrollado utilizando el software Creo Parametric 2.0, y la fabricación se llevó a cabo en una impresora 3D CubePro Trio 3D Systems, modelo 40173. Los valores de los parámetros de impresión, presentados en la tabla 1, se mantuvieron constantes y fueron seleccionados en base a las recomendaciones del fabricante para garantizar la calidad y reproducibilidad de las muestras.

Tabla 1. Parámetros fijos en el proceso de impresión 3D.

Parámetros de impresión	Valores
Densidad de relleno	100 %
Temperatura de operación	~ 240 °C
Temperatura de cama	~ 90 °C
Velocidad de impresión	15 mm/s

Diseño de experimentos

El enfoque de Diseño de Experimentos (DOE) se empleó para planificar y estructurar el trabajo de laboratorio, asegurando que los resultados fueran confiables y estadísticamente relevantes. La tabla II presenta los dos principales componentes de un DOE: factores y niveles, los cuales están organizados en forma de una matriz experimental. Para este estudio, se fabricaron un total de 18 probetas siguiendo el arreglo ortogonal propuesto por la metodología Taguchi, optimizando la cantidad de experimentos sin comprometer la calidad del análisis.

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab 19, donde se llevó a cabo un Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05. Este análisis permitió evaluar de manera cuantitativa el efecto de los parámetros seleccionados sobre las propiedades mecánicas del material, identificando aquellos factores que influyen significativamente en el desempeño de las probetas fabricadas mediante impresión 3D. Los resultados proporcionan una base sólida para comprender y optimizar los parámetros de impresión.

Tabla II. Factores y niveles en el DOE.

Parámetro	Nivel		
	1	2	3
Patrón de relleno	<i>Cross</i> ×	<i>Diamonds</i> ♦	---
Resolución (µm)	70	200	300
Orientación de impresión	Horizontal	Borde	Vertical

Ensayo de tensión

Las probetas impresas se sometieron a ensayos de tensión uniaxial. Dichos ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal Shimadzu AGS-X con una celda de carga de capacidad de 10 kN. Las condiciones de los ensayos fueron las siguientes: temperatura ambiente de 23°C, y una velocidad de avance de 50 mm/min. Las probetas presentan una geometría de 50 mm x 7 mm x ~3 mm.

Análisis mecánico dinámico

Las pruebas de tensión realizadas en la máquina universal permitieron determinar la resistencia máxima de las probetas fabricadas, identificando la muestra con el mejor desempeño mecánico. Esta muestra fue seleccionada para su posterior caracterización mediante análisis mecánico dinámico (DMA8000 Perkin Elmer), con el objetivo de complementar la evaluación del material. El ensayo DMA se realizó en modo *single cantilever*, con un barrido de temperatura de 20 a 200°C, una rampa de calentamiento de 2°C/min, un desplazamiento de 0.01 mm y una frecuencia de 1 Hz. Este análisis permitió estudiar las propiedades viscoelásticas del material bajo condiciones dinámicas y térmicas controladas, proporcionando una visión más integral del comportamiento del ABS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ensayo de tensión se registra la fuerza y desplazamiento de las muestras estudiadas de ABS en color verde, figura 1. Los resultados se presentan en tres secciones: en la primera sección se discuten los resultados del comportamiento mecánico del polímero en relación con las condiciones del patrón, resolución y orientación seleccionados. En la segunda, se presentan y discuten los resultados estadísticos para evaluar los factores significativos en el comportamiento mecánico. Finalmente, se presenta la predicción de la mejor combinación de factores para obtener la fuerza de tensión óptima del material.

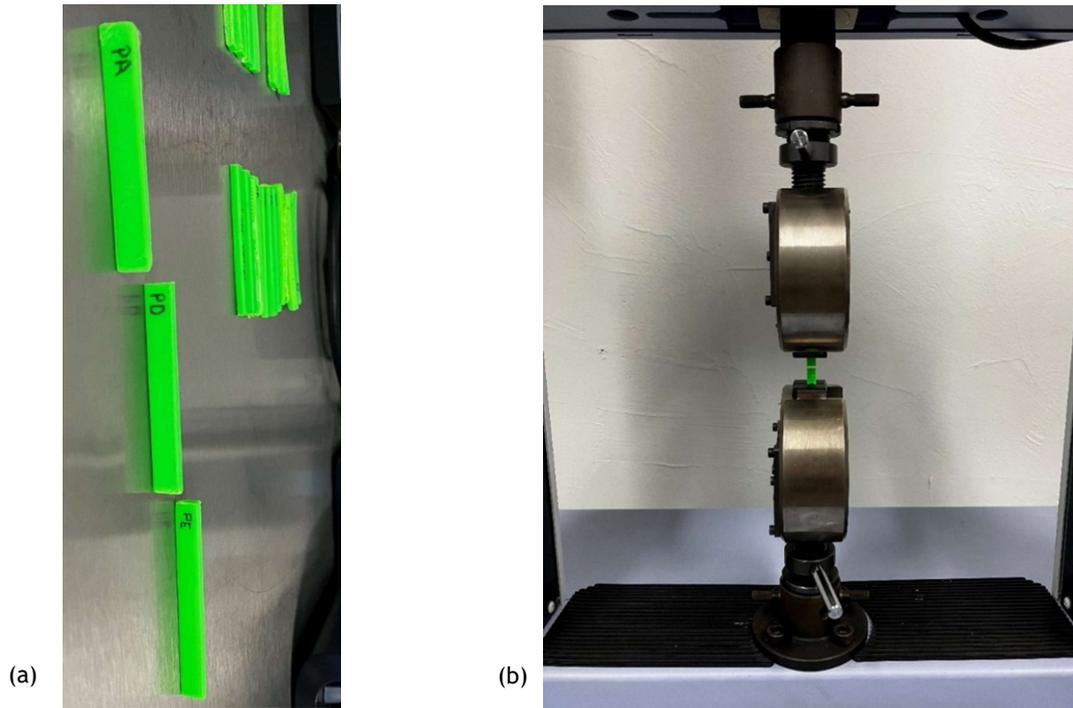


Fig. 1. (a) Probetas impresas 3D y (b) Ensayo de tensión.

Patrón de relleno

Las diferentes estrategias de relleno influyen directamente en el rendimiento mecánico de un componente impreso en 3D.¹¹ Por lo tanto, es de suma importancia seleccionar los parámetros que influyen en la pieza. Se seleccionaron dos diferentes patrones de relleno para mostrar su efecto sobre la resistencia de tensión máxima (UTS) del filamento ABS. Los resultados en la figura 2 muestran que el patrón *cross* presenta mayor fuerza de tensión en comparación con el patrón *diamonds*. De acuerdo con la literatura el patrón de panal de abeja es uno de los que presentan mejores resultados, por lo que se recomienda agregar este patrón para su estudio en futuras impresiones.^{11,18}

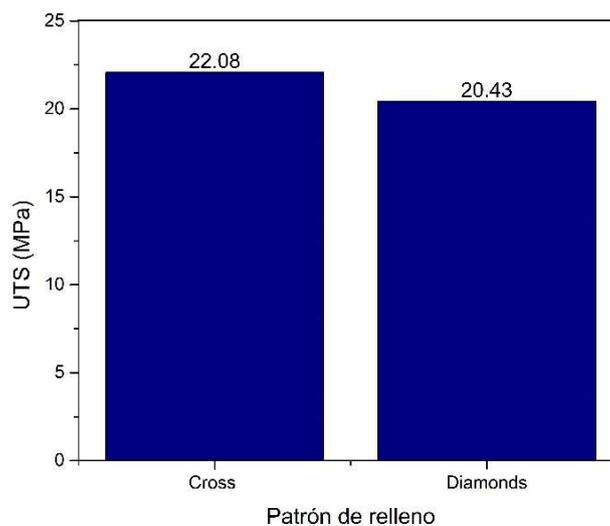


Fig. 2. Resistencia máxima a la tensión en función del patrón de relleno.

Resolución de Capa

La resolución de capa se relaciona con el espesor de las capas de filamentos depositados. El espesor de capa define la resolución en el eje Z afectando directamente el número de capas, acabado y rugosidad del objeto impreso. En general, la literatura reporta que, a mayor espesor de capa, menor calidad tendrá la pieza. Si la altura de capa es menor, el tiempo de impresión aumenta, la precisión de la pieza mejora y por lo tanto debe traducirse en mejores propiedades mecánicas. Cuando aumenta el número de capas, la carga de tensión se distribuye uniformemente en las capas adyacentes, equilibrando así las tensiones internas, que generalmente están asociadas con una estructura laminada.³ Cuanto menor sea el espesor de la capa, mejor será la unión entre capas, porque las capas se apilan estrechamente con menor aparición de micro-huecos o porosidad, en consecuencia, se obtiene una mayor resistencia a la tensión.¹⁹ De acuerdo con los resultados experimentales, la mejor respuesta mecánica se presenta con una resolución de 70 μm , figura 3.

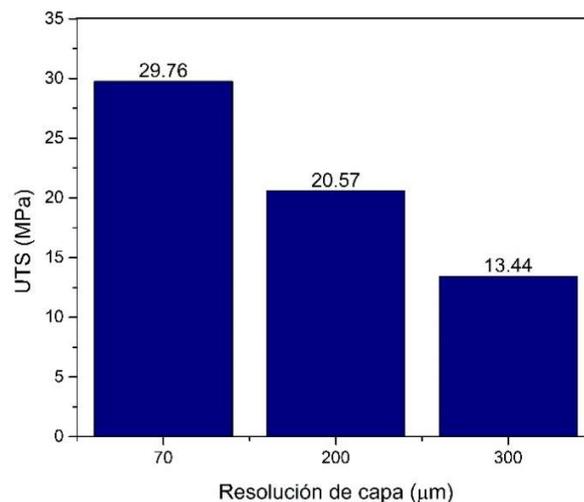


Fig. 3. Resistencia máxima a la tensión en función de la resolución de capa.

Orientación

La orientación de la impresión se refiere a cómo y en qué dirección se coloca una muestra en la plataforma de impresión 3D. Esto se observa a menudo en objetos impresos de forma anisotrópica, lo que hace que el rendimiento estructural dependa en gran medida de la orientación de la construcción de manera similar a los laminados compuestos. Los efectos de la orientación en el rendimiento mecánico de las piezas FDM se han estudiado previamente.¹³ Estos autores coinciden en que la orientación de impresión más fuerte se obtiene cuando la deposición del filamento fusionado coincide con la dirección de tensión.

Diversos autores² han reportado que probetas verticales exhiben fallas entre capas con menor rendimiento de resistencia y rigidez. Las probetas horizontales y de borde han mostrado las propiedades mecánicas más altas. Además, se ha demostrado un comportamiento de fractura frágil para la orientación vertical y un comportamiento de fractura dúctil para las orientaciones de borde y horizontal. Las probetas orientadas en el borde exhiben un mejor rendimiento de resistencia a la flexión y a la tensión, debido a una mayor efectividad en la alineación de las capas respecto a la fuerza aplicada. Además, las probetas de borde han exhibido el mejor comportamiento de tensión-deformación en términos de ductilidad. Por lo anterior, se ha concluido que las probetas de borde presentan un desempeño mecánico óptimo en términos de resistencia, rigidez y ductilidad.

Las muestras de ABS exhibieron una anisotropía notable. La orientación de la impresión afectó significativamente las propiedades mecánicas. La orientación en borde muestra los valores más altos para la máxima resistencia a la tensión, mientras que la orientación vertical y horizontal resultan en valores

bajos, figura 4. Estas diferencias se pueden explicar considerando las fallas de unión de fusión entre capas. En la orientación vertical, la orientación de la capa es perpendicular a la carga aplicada, permitiendo que las capas individuales se desprendan bajo la carga.⁶ En el caso de la orientación de borde, las probetas se estiraron paralelas a la dirección de carga por lo que las fibras individuales soportaron la mayor parte de la carga aplicada. Además, en borde existe una mayor interacción (unión) entre capas por lo que el número de capas es mayor que en la orientación horizontal. Durante la impresión horizontal existe mayor liberación de calor por lo que la unión entre capas no es tan fuerte y presenta mayor número de defectos.

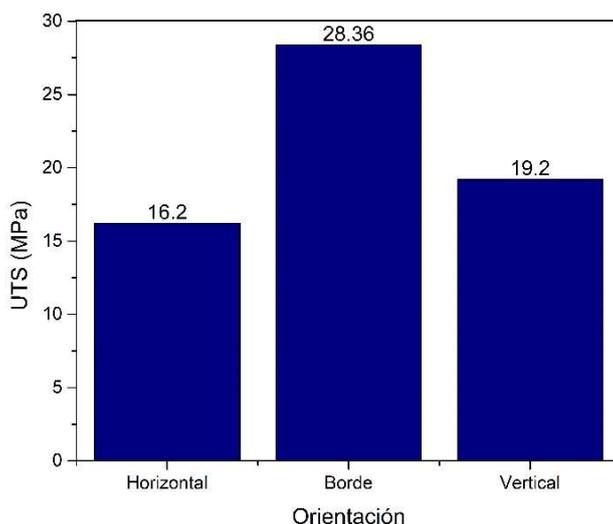


Fig. 4. Resistencia máxima a la tensión en función de la orientación.

Análisis estadístico

En la tabla III se presenta el Análisis de Varianza, ANOVA, donde es posible observar que la resolución de capa tiene el mayor impacto en la resistencia máxima de tensión. Asimismo, entre los parámetros, solo dos parámetros son estadísticamente significativos y tienen un valor de P inferior a 0.05, la orientación de impresión y la resolución de capa. Los resultados del presente estudio coinciden con los reportes de trabajos anteriores.^{14,18,20}

Tabla III. Análisis de Varianza de los parámetros de impresión.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Patrón	1	12.37	12.37	0.47	0.505
Resolución	2	803.38	401.69	15.34	0.000
Orientación	2	481.47	240.73	9.19	0.004
Error	12	314.21	26.18		
Total	17	1611.43			

El efecto de cada parámetro y sus niveles se muestran en la tabla IV, que también se denomina rendimiento promedio o efecto principal. Los parámetros óptimos se determinaron mediante la selección de la máxima relación de los promedios del efecto para cada factor, que se selecciona para maximizar la resistencia a la tensión. Como se presenta en la figura 5, el conjunto óptimo de parámetros es la combinación *cross*, 70 μ m y borde, donde la predicción arroja un UTS de 37.694 MPa.

Tabla IV. Efecto principal de los parámetros de impresión.

Nivel	Patrón	Resolución	Orientación
1	22.08	29.76	16.20
2	20.43	20.57	28.36
3	---	13.44	19.20
Delta	1.66	16.32	12.16
Rank	3	1	2

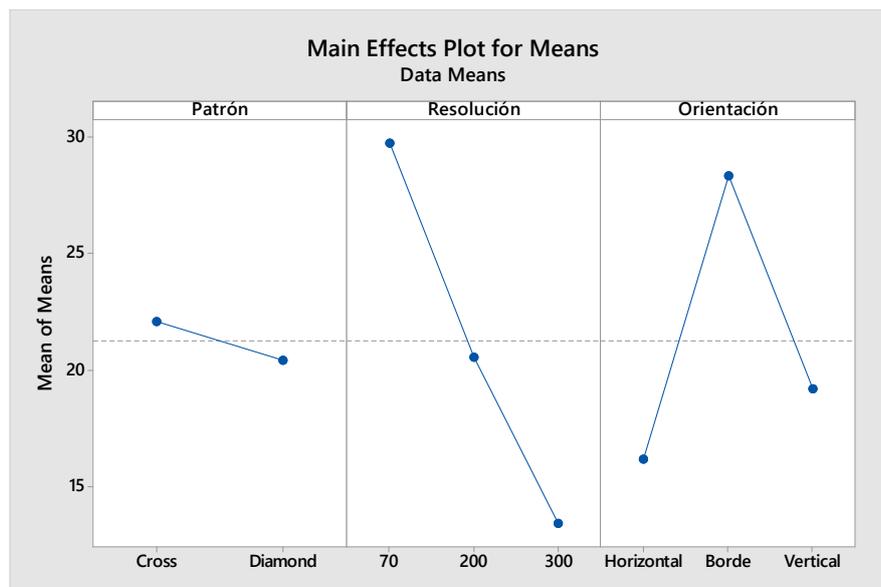


Fig. 5. Efecto promedio de UTS para los parámetros de impresión: patrón, resolución y orientación.

Análisis mecánico dinámico

La probeta seleccionada para el análisis mecánico dinámico (DMA) corresponde a la fabricada con una resolución de 70 μm , un patrón de relleno *cross* y una orientación de impresión en borde, ya que los resultados estadísticos del ensayo de tensión demostraron que estas condiciones de impresión maximizan la resistencia mecánica del ABS. Este desempeño superior en términos de resistencia hace que sea particularmente interesante explorar las propiedades viscoelásticas del material bajo estas condiciones óptimas. El análisis mediante DMA permite evaluar los módulos de almacenamiento (E') y pérdida (E'') de energía, proporcionando una comprensión más profunda de cómo estas configuraciones de impresión afectan la capacidad del material para soportar cargas dinámicas.²¹ Adicionalmente, el DMA ofrece información clave sobre el comportamiento del material frente a deformaciones dinámicas y variaciones térmicas, incluyendo aspectos como la estabilidad mecánica, la transición vítrea (T_g) y la movilidad molecular, y las capacidades de amortiguamiento del material.²² Este enfoque permite no solo confirmar el desempeño observado en los ensayos de tensión, sino también ampliar el entendimiento del material hacia aplicaciones donde las condiciones dinámicas y térmicas sean relevantes.

En la figura 6 se presentan los resultados de DMA para el ABS, se observa que E' disminuye a medida que aumenta la temperatura. Este proceso corresponde a la manifestación mecánica de la transición vítrea, la cual está asociada con un cambio conformacional debido al aumento de los grados de libertad de las cadenas poliméricas. El polímero experimenta un cambio de estado de baja movilidad molecular (estado vítreo) a un estado de alta movilidad molecular (estado cauchótico o elastomérico). A temperaturas mayores a 160°C comienza el proceso de flujo.

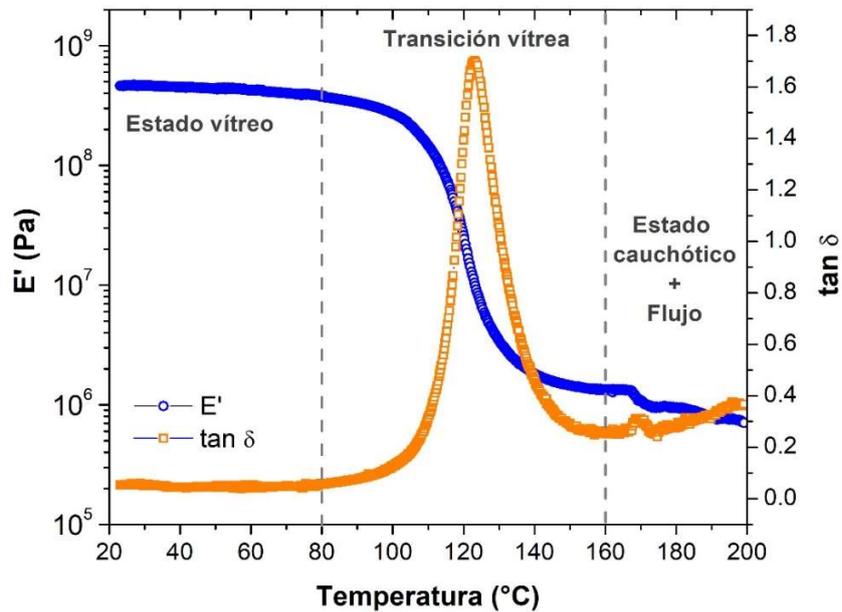


Fig.6. DMA para el ABS.

Respecto a $\tan \delta$, una relación entre las componentes viscosa y elástica del polímero ($\tan \delta = E''/E'$), para el proceso de la transición vítrea se tiene un máximo o un pico, lo cual está asociado con la máxima disipación de energía. Si tomamos el máximo a 123°C, este valor se asocia directamente con la temperatura de transición vítrea. Por encima de 160°C, $\tan \delta$ tiende a aumentar de manera considerable, lo cual implica el proceso del flujo (comportamiento viscoso). Este comportamiento es crítico para los procesos de transformación del ABS, como la inyección, la extrusión y la impresión 3D, donde la comprensión de estos cambios mecánicos y viscoelásticos es fundamental para optimizar las condiciones de procesamiento.²³

CONCLUSIONES

Se analizaron diferentes parámetros de impresión 3D para evaluar su influencia en la resistencia a la tensión máxima (UTS). Se concluye que la resolución y la orientación de la impresión tienen un considerable efecto en la UTS. La impresión en la dirección de borde produjo la disposición más resistente mecánicamente porque la fuerza aplicada fue paralela a las capas impresas. Además, la resolución de 70 μm produce una mejor calidad de impresión en las capas favoreciendo también a las propiedades mecánicas. Los mejores resultados se determinaron por medio de la metodología Taguchi dando como recomendación trabajar con 70 μm , orientación en borde y un patrón *cross*, siendo este último factor el menos significativo. Los resultados de DMA proporcionan una comprensión integral del comportamiento viscoelástico del ABS bajo condiciones dinámicas y térmicas. La transición vítrea, identificada a 123°C, resalta como un parámetro crítico para el diseño y optimización de procesos de fabricación aditiva, ya que marca el límite entre la rigidez estructural y la flexibilidad del material. Adicionalmente, el inicio del flujo a temperaturas superiores a 160°C subraya la importancia de controlar la temperatura durante el procesamiento para garantizar una transformación eficiente y reproducible del material. La selección de la muestra óptima, basada en los ensayos de tensión y corroborada con los resultados de DMA, demuestra que las configuraciones de impresión (resolución de 70 μm , patrón *cross* y orientación en borde) no solo maximizan la resistencia mecánica, sino que también aseguran un desempeño viscoelástico adecuado. Este enfoque combinado de caracterización mecánica y dinámica-mecánica valida la metodología empleada y refuerza la importancia de integrar análisis complementarios para optimizar materiales y procesos en la fabricación aditiva. Como trabajo futuro se deben analizar otros patrones de impresión, así

como aditivos y el efecto del envejecimiento físico a fin de establecer un control adecuado de los parámetros del proceso de la manufactura aditiva.

REFERENCIAS

1. Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T., Osswald, T., Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling, *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 616, pp. 1-12, 2019.
2. Štaffová, M., Ondreáš, F., Svatík, J., Zbončák, M., Jančář, J., Lepcio P., 3D printing and post-curing optimization of photopolymerized structures: Basic concepts and effective tools for improved thermomechanical properties, *Polymer Testing*, vol. 108, pp. 1-11, 2022.
3. Fontana, L., Minetola, P., Iuliano, L., Rifuggiato, S., Khandpur, M., Stiuso, V., An investigation of the influence of 3d printing parameters on the tensile strength of PLA material, *Materials Today: Proceedings*, vol. 57, Part 2, pp. 657-663, 2022.
4. Vidakis, N., Petousis, M., Velidakis, M., Spiridaki, M., Kechagias, J., Mechanical Performance of Fused Filament Fabricated and 3D-Printed Polycarbonate Polymer and Polycarbonate/Cellulose Nanofiber Nanocomposites, *Fibers*, vol. 9(11), no. 74, pp. 1-15, 2021.
5. Vidakis, N., Petousis, M., Savvakis, K., Maniadi, A., Koudoumas, E., A comprehensive investigation of the mechanical behavior and the dielectrics of pure polylactic acid (PLA) and PLA with graphene (GnP) in fused deposition modeling (FDM), *International Journal of Plastics Technology*, vol. 23, pp.195–206, 2019.
6. Hanon, M., Dobosa, J., Zsidaia, L., The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness, *Procedia Manufacturing*, vol. 54, pp. 244–249, 2021.
7. Hanon, M., Zsidai, L., Mac, Q., Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors, *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, Part 5, pp. 3089-3096, 2021.
8. Gebisa, A., Lemu, H., Investigating Effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) Processing Parameters on Flexural Properties of ULTEM 9085 using Designed Experiment, *Materials*, vol. 11, no. 11, pp 1-23, 2018.
9. Sood, A., Ohdar, R., Mahapatra, S., Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement, *Journal of Advanced Research*, vol. 3, no. 1, pp. 81-90, 2012.
10. Leite, M., Fernandes, J., Deus, A., Reis, L., Vaz, M., Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA, *3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)* pp. 547-552, 2018.
11. Chacón, J.M., Caminero, M.A., García-Plaza, E., Núñez, P.J., Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Materials & Design*, vol. 4, no. 15, pp. 143-157, 2017.
12. Wasti, S., Triggs, E., Farag, R., Auad, M., Adhikari, S., Bajwa, D., Li, M., Ragauskas, A., Influence of plasticizers on thermal and mechanical properties of biocomposite filaments made from lignin and polylactic acid for 3D printing, *Composites Part B: Engineering*, vol. 205, pp. 1-23, 2021.
13. Markiz, N., Horváth, E., Ficzer, P., Stiffness and damping behavior of 3D printed specimens, *Polymer Testing*, vol. 109, pp. 127-130, 2020.
14. Hikmat, M., Rostam, S., Ahmed, Y., Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology, *Results in Engineering*, vol. 11, pp. 1-10, 2021.
15. Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., Martorelli, M., The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, pp. 604-617, 2015.

16. Tunçel, O., Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method, *Polymers*, vol. 16, pp. 2-17, 2024.
17. Kothandaraman, L., Balasubramanian, N., Optimization of FDM printing parameters for square lattice structures: Improving mechanical characteristics, *Materials today: Proceedings*, vol. 1, 2024.
18. Nazma, M., Shadat, O., Rangan, N., Parametric optimization and sensitivity analysis of the integrated Taguchi-CRITIC-EDAS method to enhance the surface quality and tensile test behavior of 3D printed PLA and ABS parts, *Helijon*, vol. 11, pp. e41289, 2025.
19. Rajabi, A., Rostami, S., Aliha, M., Berto, F., Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies, *Procedia Structural Integrity*, vol. 34, pp. 71-77, 2021.
20. John, J., Devjani, D., Ali, S., Abdallah, S., Pervaiz, S., Optimization of 3D printed polylactic acid structures with different infill patterns using Taguchi-grey relational analysis, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 6, pp. 62-78, 2023.
21. Krivic, G., Rostam y Slavič, J., Simultaneous non-contact identification of the elastic modulus, damping and coefficient of thermal expansion in 3D-printed structures, *Polymer Testing*, vol. 125, pp. 108131, 2023.
22. Medel, F., Abad, J., Esteban, V., Influence of printing direction on 3D printed ABS specimens, *Production Engineering Archives*, vol. 26(3), pp. 107529, 2022.
23. Mishra, V., Kapil, Ch., Negi, S., Kar, S., Veeman, E., Dynamic mechanical analysis of continuous metal wire-reinforced recycled thermoplastic composite fabricated 3D printing technique, *Materials Letters*, vol. 382, pp. 137928, 2025.