

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EN EL ANÁLISIS DEL PATRÓN Y DENSIDAD DE RELLENO COMO PARÁMETROS DE CONTROL EN LA IMPRESIÓN 3D DE UNA TUERCA TIPO M36 EN ABS Y PLA

COMPUTATIONAL SIMULATION IN THE ANALYSIS OF PATTERN AND FILL DENSITY AS CONTROL PARAMETERS IN THE 3D PRINTING OF AN M36 NUT IN ABS AND PLA

Jesús Vicente González Sosa

Universidad Autónoma Nacional de México, México
vicentegonzalez60@aragon.unam.mx

Yadira Zavala Osorio

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, México
yzo@azc.uam.mx

José Ángel Hernández Rodríguez

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, México
hrja@azc.uam.mx

Enrique Ávila Soler

Tecnológico Nacional de México / IT de Gustavo A Madero, México
industrial014@gamadero.tecnm.mx

Recepción: 18/noviembre/2025

Aceptación: 24/diciembre/2025

Resumen

Este estudio analiza cómo el patrón de relleno y la densidad afectan la calidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva con ABS y PLA, específicamente una tuerca M36. Se evaluaron tres patrones de relleno (lineal, cuadrado y hexagonal) y cinco niveles de densidad (20 a 100%), observando su impacto en tiempo de fabricación, precisión dimensional e integridad estructural. Los resultados indican que patrones más complejos y mayores densidades mejoran significativamente las propiedades físicas, que aumentan el tiempo de impresión y el consumo de material. Con base en estos hallazgos, se desarrolló un análisis de simulación computacional con modelos estadísticos que relacionan el comportamiento de las piezas con el patrón y la densidad utilizados, facilitando decisiones técnicas en manufactura

aditiva. La investigación aporta información valiosa para optimizar el control y rendimiento de componentes en ABS y PLA, promoviendo aplicaciones más precisas y sostenibles en la industria.

Palabras Clave: Comportamiento mecánico, manufactura aditiva, parámetros de control, propiedades mecánicas.

Abstract

This study analyses how infill pattern and density affect the quality of parts manufactured by additive manufacturing with ABS and PLA, specifically an M36 nut. Three infill patterns (linear, square, and hexagonal) and five density levels (20 to 100%) were evaluated, observing their impact on manufacturing time, dimensional accuracy, and structural integrity. The results indicate that more complex patterns and higher densities significantly improve physical properties, which increases printing time and material consumption. Based on these findings, a computational simulation analysis was developed with statistical models that relate the behavior of the parts to the pattern and density used, facilitating technical decisions in additive manufacturing. The research provides valuable information for optimizing the control and performance of ABS and PLA components, promoting more accurate and sustainable applications in the industry.

Keywords: Additive manufacturing, control parameters, mechanical behavior, mechanical properties.

1. Introducción

En su artículo [Birosz, 2021], analiza cómo los patrones de relleno en la impresión 3D por Modelado por Deposición Fundida (FDM) afectan las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas. Se evalúan diferentes configuraciones de infill y su impacto en la resistencia, dureza y durabilidad de los objetos. Los resultados ofrecen recomendaciones para optimizar la estructura y mejorar el rendimiento de las impresiones.

En el trabajo de [Turaka,2024] se visualiza cómo la densidad de relleno afecta la morfología y las propiedades mecánicas de compuestos de Acrilonitrilo Butadieno

Estireno (ABS) y ABS reforzado con fibra de carbono (CF-ABS) impresos en 3D. Mediante un diseño de experimentos, se evalúan diferentes niveles de relleno para determinar su impacto en la estructura y resistencia de los materiales. Los resultados muestran que un aumento en la densidad de relleno mejora significativamente las propiedades mecánicas, aunque también influye en la morfología del material. Este estudio proporciona información valiosa para optimizar procesos de impresión 3D y mejorar el rendimiento de los composites.

La densidad y el patrón de relleno afectan las propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA) impreso en 3D mediante la técnica Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Se evalúan diferentes configuraciones para determinar su impacto en la resistencia y durabilidad de las piezas. Los resultados muestran que variaciones en el relleno influyen significativamente en el rendimiento estructural. Este estudio proporciona pautas para optimizar la impresión 3D en aplicaciones que requieren mayor resistencia mecánica [Akçay, 2025].

Desde el punto de vista estadístico, el artículo realiza un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la influencia de diferentes parámetros de impresión 3D en la calidad de las piezas fabricadas mediante manufactura aditiva. La metodología permite identificar variables significativas y sus interacciones, facilitando la optimización de los procesos. Los resultados estadísticos muestran diferencias significativas en las propiedades de los productos según los ajustes realizados [González, 2023]. Este enfoque contribuye a mejorar la precisión y eficiencia en la producción mediante impresión 3D.

La caracterización de las propiedades mecánicas de cuerpos de prueba ABS fabricados mediante impresión 3D, analizando cómo diferentes parámetros de extrusión afectan su rendimiento. Se evalúan aspectos como resistencia, dureza y flexibilidad, proporcionando una comprensión integral de las variaciones en las propiedades del material. Los resultados ofrecen información valiosa para optimizar procesos de fabricación aditiva y mejorar la calidad de las piezas producidas [Martins, 2016].

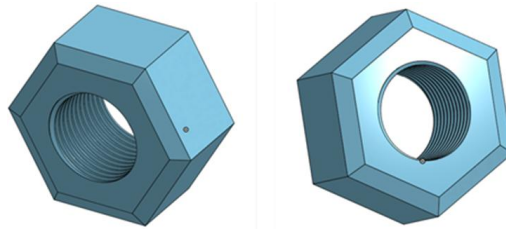
Algunas características como la posición de impresión y la densidad de relleno afectan las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en ABS mediante

impresión 3D. Se observaron variaciones significativas en la resistencia y rigidez dependiendo de la orientación de las capas y el porcentaje de relleno utilizado. Los resultados indican que configuraciones con mayor densidad y orientación horizontal mejoran el comportamiento mecánico. Este estudio destaca la importancia de optimizar parámetros de impresión para aplicaciones funcionales del ABS en manufactura aditiva [Carvajal, 2020].

2. Método

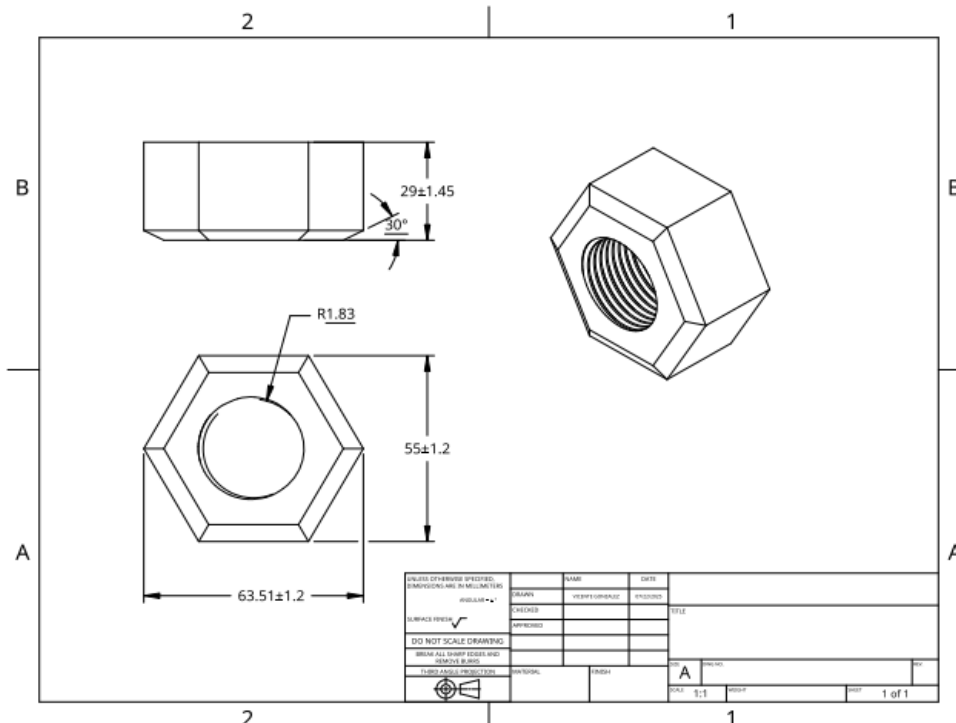
En esta sección se revisan investigaciones previas relacionadas con la impresión 3D y los parámetros de control en manufactura aditiva. Posteriormente, se diseñaron experimentos que emplearon diferentes patrones y densidades de relleno en impresoras 3D para la fabricación de muestras de materiales ABS y PLA en forma de tuercas tipo M36. Se llevó a cabo un análisis estadístico de las piezas para evaluar el efecto de dichos parámetros sobre la calidad y estimación de tiempos con simulación computacional. Finalmente, se interpretaron los resultados con el fin de identificar las configuraciones óptimas que aseguren la funcionalidad y durabilidad de las tuercas producidas mediante manufactura aditiva.

El proceso comprende la selección de parámetros de impresión, la fabricación de las muestras y la evaluación de sus propiedades mediante pruebas mecánicas y mediciones dimensionales. Se recopilaron y analizaron los datos para identificar tendencias y relaciones entre los patrones, las densidades de relleno y las propiedades finales de las piezas. Con base en estos resultados, se proponen recomendaciones para optimizar los parámetros de control en futuras producciones. Antes de diseñar los experimentos, se presenta en la Figura 1 el modelo CAD de la tuerca M36, con el fin de observar su geometría e identificar los parámetros que permitirán determinar las variables a analizar. La Figura 1 muestra una tuerca diseñada en un software CAD, con una clasificación M36, lo que indica un diámetro nominal de 36 mm. La pieza presenta detalles precisos en sus roscas y dimensiones, garantizando compatibilidad en aplicaciones mecánicas. Su diseño permite un ensamblaje seguro y eficiente en diferentes estructuras. Las dimensiones específicas de la tuerca M36 se muestran en el plano de la Figura 2.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Modelo en CAD de la tuerca M36.



Fuente: elaboración propia

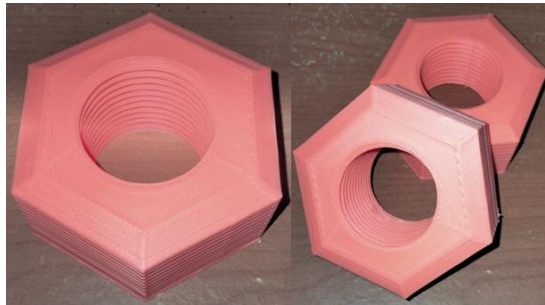
Figura 2 Plano con tolerancias de la tuerca M36.

La Figura 2 muestra el plano técnico de una tuerca hexagonal tipo M36, diseñada para procesos de manufactura mecánica o aditiva. Se especifican dimensiones clave con su tolerancia, como el diámetro exterior de 63.5 mm, la altura de 29 mm y el diámetro interior de 55 mm, además de incluir tolerancias geométricas y un chaflán de 30°. El dibujo incluye vistas ortogonales, isométrica y anotaciones detalladas para asegurar precisión en su fabricación.

Como parte del proceso de fabricación de la tuerca, se emplea la manufactura aditiva mediante impresión 3D. Durante esta etapa, se consideran diversos parámetros clave para garantizar la calidad y precisión del componente, tales como

la velocidad de impresión, la temperatura de extrusión y la resolución del modelo. La adecuada gestión de estos factores permite obtener piezas con las propiedades deseadas y un acabado óptimo. En conjunto, este enfoque facilita una producción eficiente, adaptada a las especificaciones requeridas.

La impresora que se utiliza en la fabricación de la tuerca M36 es de la marca Flashforge, modelo Adventurer 3, boquilla de 0.4 mm de diámetro, temperaturas de acuerdo con los materiales a utilizar PLA 210 °C, ABS 230 °C, altura de capa 0.18 mm, orientación del espécimen horizontal. La Figura 3, muestra la tuerca M36 fabricada en impresión 3D.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Tuerca M36 fabricada en impresión 3D.

La Figura 3 ilustra la fabricación de la tuerca mediante impresión 3D, durante la cual se identifican diversos aspectos susceptibles de mejora a través del ajuste y control de los parámetros y variables del proceso. Estos ajustes permiten optimizar la calidad del producto final, asegurando mejores propiedades mecánicas y mayor precisión dimensional. La experiencia obtenida durante la impresión facilita la identificación de áreas de mejora y la implementación de modificaciones específicas. Así, se logra obtener un producto en condiciones óptimas, cumpliendo con los requisitos establecidos. Este proceso iterativo contribuye a perfeccionar la técnica y a alcanzar resultados progresivamente más satisfactorios.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros clave considerados en el diseño de experimentos para evaluar las mejoras en la fabricación de la tuerca M36 mediante impresión 3D. Estos parámetros son fundamentales para optimizar el proceso y garantizar la calidad del producto final. La correcta identificación y control de estos

factores permitirá obtener resultados más precisos y confiables en la optimización del proceso.

Tabla 1 Parámetros en la fabricación de la tuerca M36.

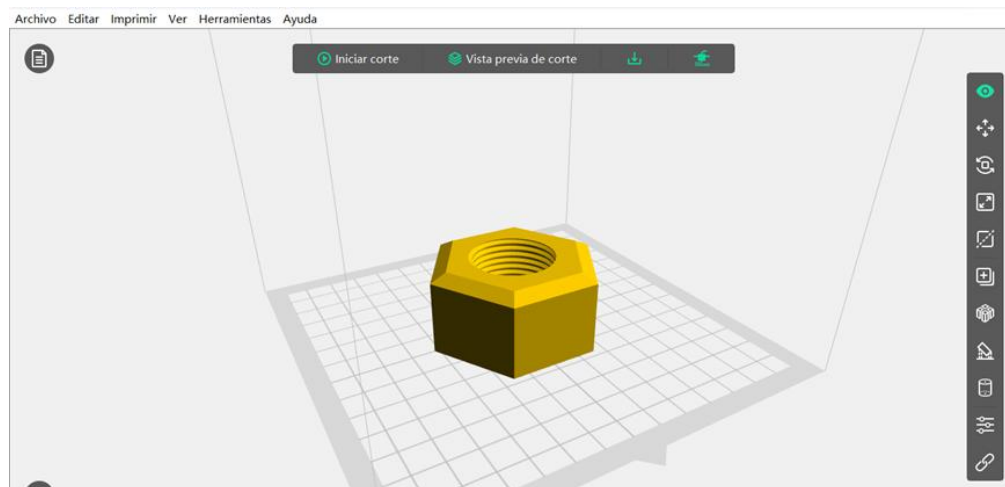
Parámetro	Unidad	Descripción
Temperatura de impresión en 3D	°C	Este parámetro corresponde a la temperatura a la que el filamento o material se funde y deposita durante el proceso de impresión. Es un factor clave que influye en la calidad, adherencia y precisión de la pieza final; una temperatura adecuada garantiza una correcta fluidez del material, así como una impresión precisa y con buena resistencia.
Velocidad de impresión en 3D	mm/s	Este parámetro se refiere a la velocidad a la que la impresora deposita el material para construir un objeto, generalmente expresada en milímetros por segundo. Influye tanto en el tiempo total de fabricación como en la calidad del acabado, ya que una velocidad excesivamente alta puede disminuir la precisión y resolución, mientras que una velocidad más baja tiende a mejorar la calidad del resultado final.
Densidad de relleno en impresión 3D	%	Este parámetro se refiere al porcentaje de material utilizado para rellenar el interior de una pieza impresa. Un 100% indica un relleno completamente sólido, mientras que valores menores generan estructuras más ligeras pero con menor resistencia. La selección adecuada de este parámetro permite ajustar la resistencia, el peso y el tiempo de impresión de la pieza.
Patrón en impresión 3D	s/u	Este parámetro se refiere a la secuencia y disposición específica de las capas y movimientos del cabezal de impresión durante el proceso. El patrón de relleno determina la forma, estructura y acabado de la pieza final, influyendo directamente en su resistencia, precisión y estética.
Soporte en impresión 3D	s/u	Se trata de una estructura temporal creada para sostener partes del modelo que presentan salientes, ángulos pronunciados o áreas en suspensión durante el proceso de impresión. Su función principal es garantizar la estabilidad y precisión del objeto hasta que la impresión finalice y la pieza pueda mantenerse por sí misma.
Espesor de soporte en impresión 3D	%	Este parámetro se refiere a la cantidad de material adicional impreso para sostener las partes sobresalientes o complejas del modelo durante el proceso de fabricación. Su función principal es prevenir la deformación o el colapso de estas áreas, facilitando una impresión más precisa y con mejor acabado.
Tiempo de impresión en 3D	Min	Este parámetro corresponde al tiempo requerido para completar una pieza o modelo, desde el inicio del proceso hasta su acabado final, incluyendo la deposición de capas y eventuales pausas. Es un factor crucial para la planificación de la producción, la optimización de recursos y la estimación de costos.
La cantidad de material utilizado en impresión 3D (Material)	g	Este parámetro se refiere a la cantidad de filamento, resina u otro material requerido para fabricar un objeto, lo cual influye en el tiempo de impresión, el costo y el impacto ambiental del proceso.

Fuente: elaboración propia

La impresión 3D requiere parámetros clave como la temperatura, que funde el material para una deposición precisa, y la velocidad de impresión, que influye en la calidad y el tiempo de fabricación. La densidad de relleno determina la resistencia y peso del objeto, mientras que el patrón de impresión afecta su estructura y acabado. Se utilizan soportes y su espesor para sostener partes complejas, y el tiempo y material consumido son esenciales para planificar y optimizar la producción.

Para la evaluación y desarrollo de este trabajo, se consideran principalmente la densidad de relleno y el patrón de impresión, dado que son los parámetros que experimentarán variaciones durante el proceso. Los demás parámetros se mantendrán constantes para garantizar la consistencia de los resultados. Esta selección permite determinar de manera precisa el impacto de estos factores en el tiempo de impresión. Como resultado, se obtiene una estimación optimizada del tiempo necesario para fabricar la tuerca mediante impresión 3D. Este enfoque facilita la mejora de la eficiencia en el proceso de fabricación.

En la Figura 4 se presenta el entorno utilizado para realizar las simulaciones de los parámetros de control, llevadas a cabo antes de la fabricación de la tuerca M36. Este entorno permitió optimizar los ajustes necesarios para garantizar la precisión y calidad del proceso. Las simulaciones facilitaron la identificación de condiciones ideales, asegurando un desempeño eficiente en la producción. De esta manera, se logró una planificación más efectiva y confiable para la fabricación de la pieza.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Entorno del software para evaluar parámetros en la tuerca M36.

En los siguientes párrafos se describen los efectos de las modificaciones en cada uno de los parámetros seleccionados para el análisis del caso de estudio de la tuerca M36. La Tabla 2 presenta la información necesaria para llevar a cabo las simulaciones correspondientes. Estas observaciones permiten comprender cómo impactan los cambios en los parámetros previamente. En la Tabla 3, se tienen los datos extraídos de la simulación para un material con las diferentes modificaciones, formando parte del análisis a la tuerca M36. Desde un punto de vista técnico, la Tabla 3 muestra cómo la velocidad de impresión y la densidad de relleno influyen significativamente en el tiempo de impresión y en la cantidad de material utilizado para diferentes patrones. Es evidente que, a mayor velocidad y densidad, tanto el tiempo como el material requerido aumentan, especialmente en patrones hexagonales y de cuadrícula, lo que sugiere una relación directa entre estos parámetros. El patrón lineal presenta una progresión más lineal en comparación con los otros patrones, lo que puede facilitar la planificación y optimización del proceso de impresión en función de los recursos disponibles y los tiempos deseados.

Tabla 2 Parámetros modificables en las simulaciones para la tuerca M36.

Parámetro	Modificación
Material	ABS Y PLA
Velocidad de impresión	5 – 150 mm/s
Densidad de relleno	0 – 100%
Patrón	Lineal, hexagonal y cuadrícula.

Fuente: elaboración propia

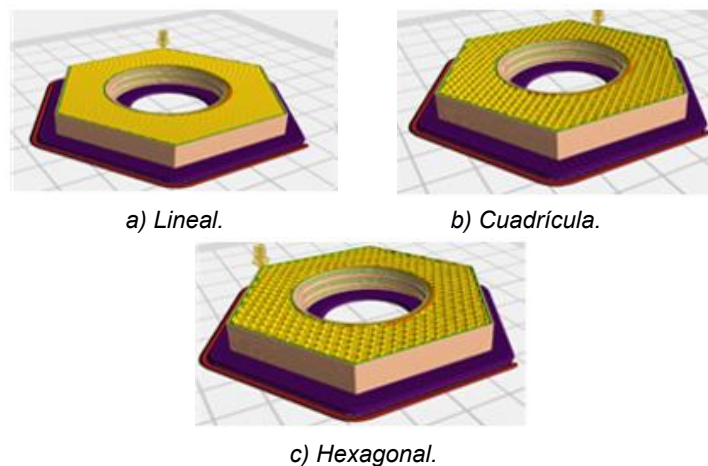
Tabla 3 Datos de la primera simulación de análisis para la tuerca M36-ABS.

Parámetro	Modificación					
Material	ABS					
Velocidad de impresión [mm/s]	25	50	75	100	125	150
Densidad de relleno [%]	0	20	40	60	80	100
Patrón	Lineal					
Tiempo de impresión [min]	100	124	147	170	192	214
Cantidad de material [g]	14.55	25.41	30.05	44.58	54.1	63.64
Patrón	Hexagonal					
Tiempo de impresión [min]	100	149	214	291	375	214
Cantidad de material [g]	14.55	26.83	35.46	44.82	54.04	63.64
Patrón	Cuadrícula					
Tiempo de impresión [min]	100	113	130	147	165	214
Cantidad de material [g]	14.55	21.95	29.11	34.43	43.7	63.64

Fuente: elaboración propia

Para este caso de estudio, tuerca M36, es recomendable realizar un análisis adicional para determinar la eficiencia en términos de la relación entre tiempo, material y calidad de impresión. Asimismo, es importante explorar cómo la variación en la velocidad y densidad puede afectar otras propiedades mecánicas del material impreso. Este enfoque permitirá optimizar los parámetros de impresión para alcanzar resultados más eficientes y sostenibles, ajustando los patrones según las necesidades específicas del producto final.

Por otro lado, en la Figura 5 se presentan los patrones evaluados en la tuerca M36 utilizando el software correspondiente. La Tabla 4 presenta los resultados de la simulación realizada para el material PLA.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Patrones seleccionados para el análisis en la tuerca M36.

Tabla 4 Datos de la primera simulación de análisis para la tuerca M36-PLA.

Parámetro	Modificación					
Material	PLA					
Velocidad de impresión [mm/s]	25	50	75	100	125	150
Densidad de relleno [%]	0	20	40	60	80	100
Patrón	Lineal					
Tiempo de impresión [min]	99	123	146	169	192	213
Cantidad de material [g]	19.11	32.13	43.7	55.14	66.56	78
Patrón	Hexagonal					
Tiempo de impresión [min]	99	149	214	291	375	213
Cantidad de material [g]	19.11	33.83	44.21	55.45	66.47	78
Patrón	Cuadrícula					
Tiempo de impresión [min]	99	113	129	147	164	213
Cantidad de material [g]	19.11	27.99	36.58	45.36	54.09	78

Fuente: elaboración propia

El análisis de los parámetros de impresión en PLA muestra que, al incrementar la velocidad de 50 a 150 *mm/s*, tanto el tiempo de impresión como la cantidad de material utilizado aumentan en diferentes patrones. Por ejemplo, con patrón lineal, el tiempo pasa de 123 a 192 *minutos*, mientras que, en patrón hexagonal, de 149 a 375 *minutos*, lo que refleja una mayor complejidad en el proceso. Asimismo, la densidad de relleno influye significativamente en estos valores, siendo máxima en 100% y mínima en 20%.

En la siguiente sección se presentan los resultados de un análisis estadístico realizado para complementar el estudio de la tuerca M36, con énfasis en su fabricación mediante manufactura aditiva por impresión 3D. Estos datos permiten evaluar la viabilidad y las características del proceso productivo, proporcionando una visión más precisa sobre la calidad y precisión de la fabricación. La información obtenida será fundamental para optimizar los parámetros de fabricación y garantizar la funcionalidad del componente. Además, el análisis contribuye a validar la idoneidad de la impresión 3D en la producción de piezas de este tipo. En conjunto, estos resultados fortalecen el estudio técnico y científico de la pieza.

3. Resultados

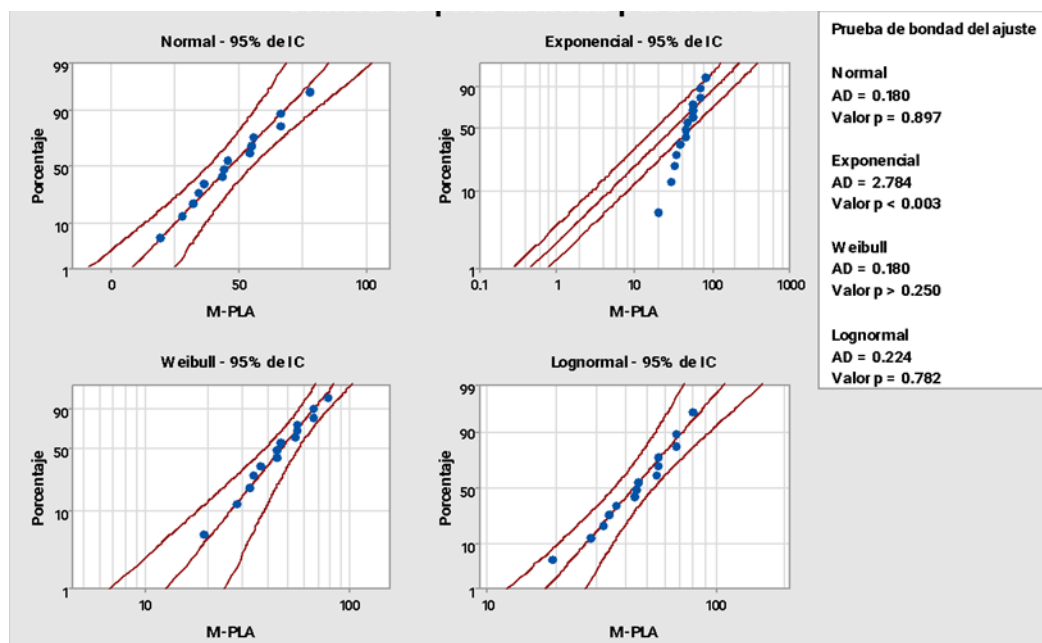
Con base en los parámetros definidos en el diseño de experimentos para el análisis de la tuerca M36, se empleó software estadístico para identificar la distribución adecuada a los datos obtenidos. Los datos utilizados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Datos obtenidos para análisis estadístico de la Tuerca M36.

Parámetro	Modificación
Material	PLA
Tiempo de impresión [<i>min</i>]	99, 123, 146, 169, 192, 213, 99, 149, 214, 291, 375, 213, 99, 113, 129, 147, 164, 213.
Cantidad de material [<i>g</i>]	19.11, 32.13, 43.7, 55.14, 66.56, 78, 19.11, 33.83, 44.21, 55.45, 66.47, 78, 19.11, 27.99, 36.58, 45.36, 54.09, 78.
Material	ABS
Tiempo de impresión [<i>min</i>]	100, 124, 147, 170, 192, 214, 100, 149, 214, 291, 375, 214, 100, 113, 130, 147, 165, 214.
Cantidad de material [<i>g</i>]	14.55, 25.41, 30.05, 44.58, 54.1, 63.64, 14.55, 26.83, 35.46, 44.82, 54.04, 63.64, 14.55, 21.95, 29.11, 34.43, 43.7, 63.64.

Fuente: elaboración propia

En la Figura 6 se observan las distintas distribuciones que pueden analizarse para el caso de estudio, y se identifica que se han considerado todos los valores extraídos de las simulaciones, sin descartar los valores repetitivos que se obtienen por la repetibilidad de los procesos en la simulación. Esta decisión garantiza que la variabilidad inherente al proceso esté plenamente representada y evita sesgos introducidos por filtrados prematuros. Se verifica que las frecuencias observadas conservan la estructura de las distribuciones, lo que facilita la comparación entre escenarios y condiciones de entrada. También se destacan las replicas y sus dispersiones, permitiendo evaluar la robustez de los resultados frente a variaciones aleatorias. En conjunto, la Figura 6 ofrece una visión integral de la distribución de resultados y sirve como base para análisis de sensibilidad e interpretación de la estabilidad del modelo.



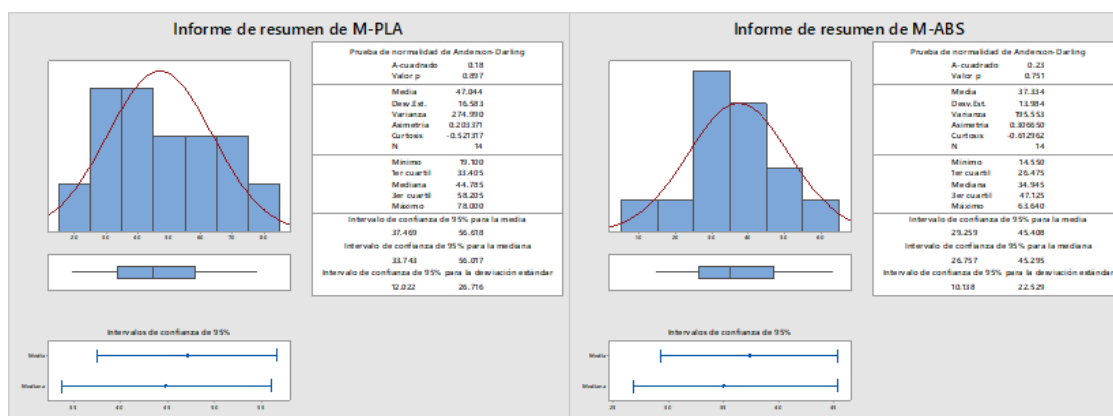
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Identificación de la distribución para análisis estadístico en la tuerca M36.

De la misma forma la Figura 6 presenta gráficos de probabilidad para el material M-PLA ajustados a cuatro distribuciones: normal, exponencial, Weibull y lognormal, junto con sus intervalos de confianza al 95%. Cada gráfico permite visualizar el grado de alineación entre los datos observados y la distribución teórica

correspondiente. La selección del modelo más adecuado se fundamenta en la prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling (AD) favoreciendo aquellos con menor estadístico AD y valor p mayor. En este caso, las distribuciones normal ($AD = 0.180$, $p = 0.897$), Weibull ($AD = 0.180$, $p = 0.250$) y lognormal ($AD = 0.224$, $p = 0.782$) presentan un buen ajuste, mientras que la distribución exponencial es descartada debido a su alto valor de AD (2.784) y bajo valor p (< 0.003).

En la Figura 7 se presentan los informes de resumen estadístico para los materiales M-PLA y M-ABS, incluyendo histogramas, pruebas de normalidad de Anderson-Darling y análisis de intervalos de confianza. Para M-PLA, el valor de AD es 0.181 con un valor p de 0.471, mientras que para M-ABS el AD es 0.293 con p de 0.167, lo que indica que ambos casos no se rechaza la hipótesis de normalidad. Las medias son 41.44 para M-PLA y 37.81 para M-ABS, con desviaciones estándar de 11.56 y 7.19 respectivamente. Se incluyen diagramas de caja y bigotes, así como intervalos de confianza al 95% para media, mediana y desviación estándar.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Distribución normal prueba Anders-Darling en la tuerca M36.

Asimismo, se observa que el material M-PLA presenta una mayor dispersión en sus datos, evidenciada por una varianza mayor (133.62) en comparación con M-ABS (51.66). Los histogramas de ambos materiales muestran una distribución aproximadamente simétrica, aunque M-PLA presenta una ligera asimetría hacia la izquierda. Los valores de curtosis y asimetría se aproximan a los esperados en una

distribución normal, lo que respalda la validez de los análisis estadísticos aplicados. Los intervalos de confianza para la media y mediana son más amplios en M-PLA, indicando una mayor incertidumbre en la estimación de sus parámetros poblacionales. En contraste, los resultados del M-ABS muestran menor variabilidad y una distribución más concentrada alrededor de su media. Estos análisis son fundamentales para evaluar la homogeneidad y confiabilidad de los materiales en procesos de manufactura aditiva.

4. Discusión

En [Griebler, 2025], se destaca la importancia de las propiedades del material y su influencia en la calidad de impresión, similar a cómo el control de la densidad de relleno afecta la resistencia y peso de las piezas en 3D. El modelo propuesto permite optimizar la compatibilidad de los rellenos, comparándose con la selección de patrones de impresión que mejoran la precisión y acabado en los objetos fabricados. En conjunto, ambos enfoques buscan mejorar la eficiencia y calidad del proceso de fabricación aditiva mediante la gestión de parámetros clave.

El estudio revela que los patrones de relleno en TPU influyen significativamente en la resistencia y flexibilidad de las tuberías impresas, permitiendo optimizar su rendimiento para aplicaciones específicas. Se identificaron configuraciones que mejoran la durabilidad y reducen el uso de material, aumentando la eficiencia del proceso de fabricación aditiva. Estos hallazgos ofrecen una guía valiosa para diseñar componentes más resistentes y eficientes en la industria de tuberías [Benjamin, 2024].

El trabajo de [León, 2020], revela que las partes de manufactura aditiva reforzadas con fibras continuas presentan una mayor resistencia mecánica y durabilidad en comparación con las estructuras no reforzadas. Sin embargo, también se identifican áreas de daño por fatiga y delaminación que pueden afectar su integridad a largo plazo. Estos hallazgos destacan la importancia de optimizar los procesos de refuerzo para mejorar el rendimiento y la fiabilidad de estas piezas.

Es importante mostrar e identificar que la densidad de las probetas fabricadas en manufactura aditiva de PLA tiene un impacto significativo en sus propiedades

mecánicas compresivas, siendo mayor conforme aumenta la densidad. Los parámetros de relleno, como la proporción y la orientación, influyen en la resistencia y rigidez de las muestras, mejorando sus prestaciones mecánicas. Se encontró que configuraciones con mayor porcentaje de relleno presentan un incremento en la resistencia a la compresión. En conjunto, estos resultados permiten optimizar los procesos de fabricación para obtener componentes más resistentes y duraderos en aplicaciones estructurales [Serrano, 2022].

Un aumento en la densidad de relleno mejora significativamente la resistencia a la tracción de los composites de PET glicolizado reforzados con fibra de carbono fabricados mediante FDM [Daly, 2024]. Los patrones de relleno influyen en la distribución de esfuerzos, siendo los patrones rectilíneos los que ofrecen mayor resistencia. La combinación de mayor densidad y ciertos patrones optimiza las propiedades mecánicas, destacando su potencial para aplicaciones estructurales. Estos hallazgos permiten diseñar componentes 3D más resistentes y eficientes mediante ajustes en el relleno.

5. Conclusiones

Este estudio reafirma que la densidad de relleno y el patrón de impresión son parámetros fundamentales para controlar las propiedades mecánicas de piezas fabricadas por manufactura aditiva. La revisión de literatura muestra coincidencias en que una mayor densidad incrementa la resistencia estructural, mientras que ciertos patrones de relleno ofrecen una distribución más eficiente de esfuerzos. Estos hallazgos permiten establecer criterios de selección óptimos para diferentes aplicaciones funcionales de PLA y ABS. Así, se fortalece la base conceptual para una impresión 3D más controlada y predictiva.

Experimentalmente, los resultados obtenidos en la fabricación de tuercas M36 evidencian la influencia directa de los parámetros seleccionados sobre el tiempo de impresión, consumo de material y calidad dimensional. Se observó que los patrones hexagonales, aunque más resistentes, implican mayores tiempos y consumo, mientras que el patrón lineal ofrece un mejor balance de eficiencia en la impresión. Las simulaciones previas permitieron anticipar estos efectos y optimizar las

condiciones de fabricación. Esto demuestra que una adecuada planificación experimental mejora la reproducibilidad y funcionalidad de las piezas impresas. La metodología empleada puede aplicarse en otros estudios de manufactura aditiva para distintos tipos de geometría.

Desde el análisis estadístico, se utilizó la prueba de Anderson-Darling para validar la distribución de los datos, encontrando que los valores de tiempo y cantidad de material para M-PLA y M-ABS se ajustan bien a modelos normal, lognormal y Weibull. Las pruebas de normalidad permitieron confirmar la consistencia de los datos y reducir la incertidumbre en la interpretación de resultados. La diferencia en varianza entre materiales evidenció mayor dispersión en PLA, lo cual es clave para definir márgenes de seguridad en aplicaciones estructurales.

La integración de técnicas estadísticas y simulaciones previas a la fabricación representa un enfoque robusto para optimizar procesos de impresión 3D. Se recomienda continuar con pruebas mecánicas de esfuerzo y fatiga para ampliar el entendimiento del comportamiento del material bajo condiciones reales. Asimismo, incorporar nuevos patrones y otros polímeros podría expandir las posibilidades de aplicación. En conjunto, el estudio demuestra que el control preciso de parámetros mejora significativamente la calidad y eficiencia de las piezas impresas. Este enfoque integral fortalece la toma de decisiones en procesos industriales de manufactura aditiva.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Akçay, Ö., & Arı, A. Effect of Infill Density and Infill Pattern on Mechanical Properties of 3D-printed PLA Produced by FFF. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 37(1), pp. 223–232, 2025.
- [2] Benjamin Lazarus S., Raja S., Shanmugam K., Simon Yishak. Analysis and Optimization of Thermoplastic Polyurethane Infill Patterns for Additive Manufacturing in Pipeline Applications. *Advances in Polymer Technology*, 2024.
- [3] Birosz, M. T., Andó, M., & Ledenyák, D. Effect of FDM Infill Patterns on Mechanical Properties. *SSRN Electronic Journal*. 113, 107654, 2021.

- [4] Carvajal, Loaiza, M. J., González Díaz, P., Mejía Blandón, C. A., Bustamante Góez, L. M., & Villarraga Ossa, J. A. Influencia de la posición de impresión y la densidad de relleno en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en ABS. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(37), pp. 179–193, 2020.
- [5] Daly, M., Tarfaoui, M., Bouali, M., & Bendarma, A. Effects of Infill Density and Pattern on the Tensile Mechanical Behavior of 3D-Printed Glycolized Polyethylene Terephthalate Reinforced with Carbon-Fiber Composites by the FDM Process. *Journal of Composites Science*, 8(4), 2024.
- [6] González-Sosa, J. V., & García-Carranco, S. M. Análisis de varianza en manufactura aditiva con impresión 3D. *DYNA*, 90(227), pp. 167–175, 2023.
- [7] Griebler, J. J., Tappan, A. S., Rogers, S. A., Grillet, A. M., & Kopatz, J. W. Printability criterion and filler characteristics model for material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 99, pp. 104651, 2025.
- [8] León, B., J., Díaz-Rodríguez, J. G., & González-Estrada, O. A. Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), pp. 161–175, 2020.
- [9] Martins, G. D., Pereira, G. D., Goncalves, S. G., Resenda, Da Silva, R.R. & Maziero, R. Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba ABS confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3D. *revista Iberoamericana de Polímeros*, 17(6), pp. 303-309, 2016.
- [10] Serrano-Cinchilla, L., Bustamante-Góez, L., & Villarraga-Ossa, J. A. Influencia de la densidad y de los parámetros de relleno en las propiedades mecánicas compresivas de probetas fabricadas en manufactura aditiva de PLA. *Revista UIS Ingenierías*, 21(2), pp. 107–114, 2022.
- [11] Turaka, S., Jagannati, V., Pappula, B., & Makgato, S. Impact of infill density on morphology and mechanical properties of 3D printed ABS/CF-ABS composites using design of experiments. *Heliyon*, 10(9), e29920, 2024.