


## Manufactura de piezas metálicas por FDM y sinterizado Manufacturing of metallic parts using FDM and sintering

F. Villagómez-Sánchez <sup>a,\*</sup>, J.M. Zea-Pérez <sup>a</sup>, C. Rubio-González <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Politécnica de Querétaro, Carretera Estatal 420 SN El Marqués Querétaro, CP 76240

<sup>b</sup> Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Epigmenio González 500 Fracc. San Pablo, Querétaro, C.P.76130, México.

### Resumen

Este trabajo presenta un estudio preliminar sobre la manufactura de piezas metálicas mediante modelado por deposición fundida (FDM) y posterior sinterizado. Se fabricó un engrane de bronce con diámetro exterior de 50 mm, diámetro interior de 15 mm, espesor de 3,85 mm y perforaciones de 3 mm. El proceso incluyó la impresión con filamento compuesto bronce/PLA, debinding y sinterizado en mufla convencional. Durante la impresión se emplearon parámetros de 235 °C de extrusión, 60 °C de cama, 0,20 mm de altura de capa, 40 mm/s de velocidad, 90 % de relleno rectilíneo y 120 % de flujo. Los resultados dimensionales mostraron contracciones de hasta 12 % en el diámetro interior y 34,5 % en perforaciones; el espesor presentó variaciones de -4,67 % a +2,33 %. La dureza Rockwell HRB se ubicó entre 49 y 64. Tras el sinterizado, las piezas conservaron la geometría general, con irregularidades superficiales y porosidad asociadas a la eliminación no controlada del aglutinante. También se imprimieron piezas en acero inoxidable 316L (solo etapa de impresión); el proceso no se completó por limitaciones de temperatura del equipo. Estos hallazgos evidencian la factibilidad del enfoque y la necesidad de estudios adicionales orientados al control de contracción, densificación y acabado superficial.

**Palabras Clave:** Manufactura aditiva, FDM, sinterizado, piezas metálicas, bronce.

### Abstract

This work presents a preliminary study on the manufacturing of metallic parts using Fused Deposition Modeling (FDM) followed by sintering. A bronze gear was fabricated with an outer diameter of 50 mm, an inner diameter of 15 mm, a thickness of 3.85 mm, and 3 mm mounting holes. The process included printing with a bronze/PLA composite filament, debinding, and sintering in a conventional furnace. Printing parameters were 235 °C nozzle temperature, 60 °C bed temperature, 0.20 mm layer height, 40 mm/s printing speed, 90% rectilinear infill, and 120% flow. Dimensional results showed up to 12% shrinkage in the inner diameter and 34.5% in mounting holes; thickness varied from -4.67% to +2.33%. Rockwell HRB hardness ranged from 49 to 64. After sintering, parts preserved the overall geometry, although surface irregularities and porosity were observed due to the uncontrolled removal of the polymeric binder. Stainless steel 316L parts were printed (printing stage only); the process could not be completed due to furnace temperature limitations. These findings demonstrate feasibility and highlight the need for further work to optimize shrinkage control, densification, and surface finish.

**Keywords:** Additive manufacturing, FDM, sintering, metal parts, bronze.

### 1. Introducción

La manufactura aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, ha revolucionado la forma en que se diseñan y fabrican productos en diversas industrias. A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación sustractiva, como el maquinado CNC, la manufactura aditiva permite la creación de piezas con geometrías complejas y personalizadas, reduciendo el desperdicio de material y los tiempos de producción (Wohlers, 2023). Entre las tecnologías de impresión 3D, el Modelado por Deposición Fundida (FDM) se ha destacado por su accesibilidad, bajo costo y versatilidad, principalmente en la producción de piezas poliméricas (González-Gutiérrez et

al., 2018). Sin embargo, en los últimos años, ha surgido un interés creciente en extender esta tecnología a la fabricación de piezas metálicas, lo que abre nuevas posibilidades en sectores como la aeronáutica, la automoción y la medicina (Liu et al., 2019).

El proceso de FDM para metales implica la utilización de filamentos compuestos por partículas metálicas dispersas en una matriz polimérica. Estos filamentos se extruyen capa por capa para construir la pieza en su estado "verde". Posteriormente, la pieza se somete a un proceso de debinding (eliminación del aglutinante polimérico) y sinterizado (consolidación de las partículas metálicas a alta temperatura) para obtener una pieza metálica densa y funcional

\*Autor para la correspondencia: franciscovillagomez2990@gmail.com

Correo electrónico: franciscovillagomez2990@gmail.com (Francisco Villagómez-Sánchez), marcos.zea@upq.mx (José Marcos Zea-Pérez), crubio@tec.mx (Carlos Rubio-González)

**Historial del manuscrito:** recibido el 18/03/2025, última versión-revisada recibida el 23/09/2025, aceptado el 27/10/2025, en línea (postprint) desde el 21/11/2025, publicado el 05/07/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14i27.14717>

(González-Gutiérrez et al., 2018). Aunque este enfoque combina las ventajas de la impresión 3D con las propiedades mecánicas de los metales, también presenta desafíos significativos, como la contracción dimensional, la porosidad residual y la variabilidad en las propiedades mecánicas (Sadaf et al., 2024).

significativo en la eficiencia y el rendimiento de los componentes (Wohlers, 2023).

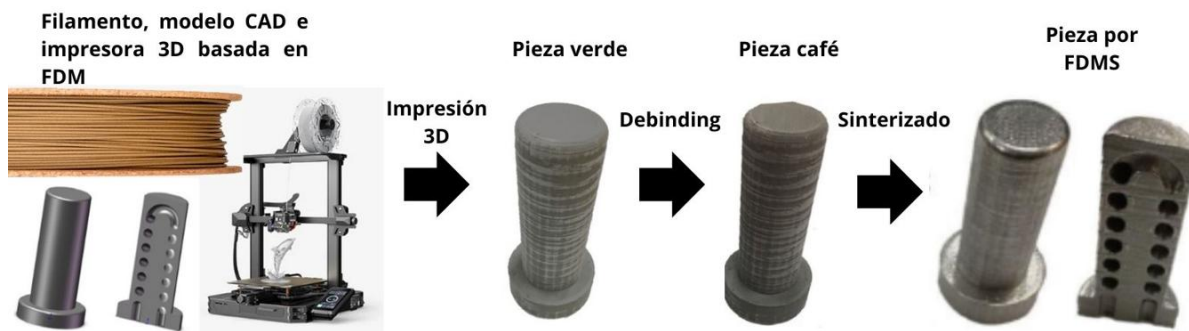


Figura 1: Estructura metodológica propuesta (B. Liu et al. 2019)

Uno de los principales desafíos en la manufactura aditiva de piezas metálicas mediante FDM es la optimización de los parámetros de impresión y sinterizado. La calidad de las piezas finales depende en gran medida de factores como la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión, la altura de capa y las condiciones de sinterizado (Ahmet et al., 2021). Además, la falta de equipamiento especializado para el debinding y sinterizado controlado puede limitar la reproducibilidad y la calidad de las piezas (Vallejo, 2023). Estos desafíos son particularmente relevantes en materiales como el bronce y el acero inoxidable 316L, que son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales debido a su resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la corrosión (González-Gutiérrez et al., 2018).

En este trabajo se explora la fabricación de un engrane de bronce mediante FDM y sinterizado, con énfasis en la caracterización preliminar dimensional, superficial y de dureza. El propósito no es presentar una optimización exhaustiva, sino documentar el comportamiento del proceso

## 2. Metodología

### 2.1. Modelo para el análisis

La geometría seleccionada para este estudio correspondió a un engrane recto diseñado con las siguientes dimensiones de referencia: diámetro exterior de 50 mm, diámetro interior de 15 mm, espesor del cuerpo de 3.85 mm y perforaciones de montaje de 3 mm de diámetro. En la Figura 2 se muestra el plano técnico del engrane utilizado como base para el proceso de manufactura.

Las piezas fueron impresas en una impresora 3D Creality Ender-3 S1 Pro, empleando filamento compuesto de bronce/PLA. Los parámetros de impresión empleados se resumen en la Tabla 1 (bronce) y Tabla 2 (acero inoxidable 316L, etapa de impresión únicamente). Entre los valores principales destacan: temperatura de extrusión de 235 °C, temperatura de plataforma de 60 °C, altura de capa de 0.20

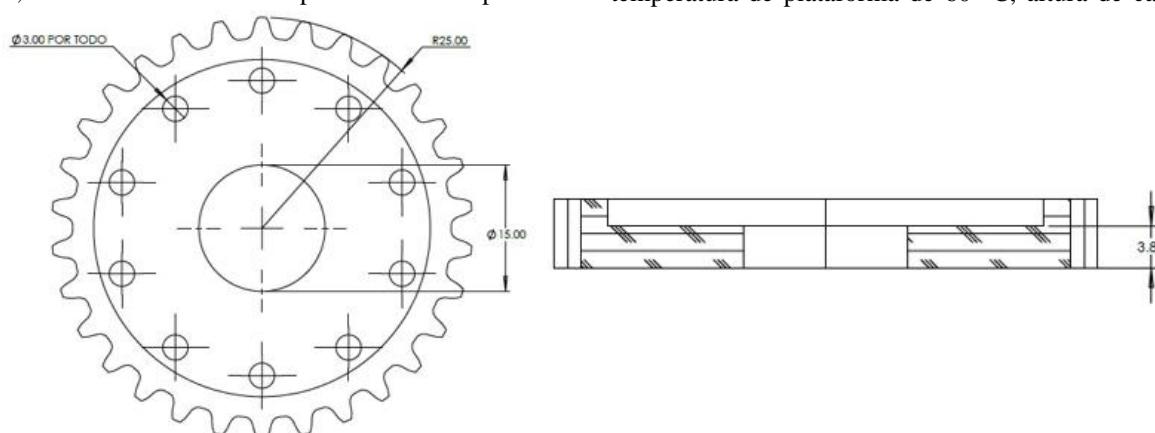


Figura 2: Propuesta de modelo 3D para el desarrollo del proceso de manufactura por FDM y sinterizado

con equipamiento disponible (mufla sin rampas programables) y delimitar áreas de mejora para etapas posteriores (control de rampa, atmósferas, geometrías adicionales y referencias comparativas).

Este trabajo no solo contribuye al avance de la manufactura aditiva de metales, sino que también proporciona información valiosa para la industria, donde la capacidad de producir piezas metálicas complejas y personalizadas puede tener un impacto

mm, velocidad de impresión de 40 mm/s, relleno rectilíneo al 90% y flujo de extrusión del 120%.

Tabla 1: Parámetros de impresión para filamento compuesto de bronce

BRONCE	
Parámetro	Valor
Temperatura de extrusión	235°C

<b>Temperatura de plataforma</b>	<b>60°C</b>
<b>Velocidad de impresión</b>	40 mm/s
<b>Altura de capa</b>	0.20 mm
<b>Relleno</b>	90%
<b>Patrón de relleno</b>	Rectilíneo
<b>Flujo</b>	120%

Tabla 2: Parámetros de impresión para filamento compuesto de acero inoxidable 316L

<b>ACERO INOXIDABLE 316L</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Temperatura de extrusión</b>	225°C
<b>Temperatura de plataforma</b>	60°C
<b>Velocidad de impresión</b>	40 mm/s
<b>Altura de capa</b>	0.20 mm
<b>Relleno</b>	90%
<b>Patrón de relleno</b>	Rectilíneo
<b>Flujo</b>	120%

## 2.2. Proceso de debinding y sinterizado:

El posprocesamiento térmico se llevó a cabo en una mufla Felisa FE-360, con una temperatura máxima de operación de 1100 °C. Dado que el equipo no cuenta con control programable de rampas de calentamiento, el proceso de debinding y sinterizado se realizó bajo atmósfera de aire y sin control preciso de la eliminación del aglutinante polimérico.

Se desarrolló el procesamiento con una rampa de calentamiento con incremento manual a razón de 55.6°C por hora hasta llegar a 482°C y una permanencia de 4 horas. Posteriormente, las piezas se sinterizaron con una rampa de calentamiento con incremento manual a razón de 111.1°C por hora hasta llegar a la temperatura de sinterizado (885°C para el bronce) permaneciendo durante 5 horas, utilizando polvo de alúmina para prevenir la oxidación.

## 2.3. Caracterización de las piezas:

Se evaluó la contracción dimensional, la dureza Rockwell B y la calidad superficial de las piezas sinterizadas. Las mediciones dimensionales se realizaron con un calibrador digital de 6" con SPC TTC y un micrómetro de exteriores de 0–1 in, IP65 (Mitutoyo), ambos con resolución de 0.01 mm en diferentes elementos de referencia dimensional como el diámetro exterior de la pieza, el diámetro interior, el espesor del cuerpo y las perforaciones de montaje, mientras que la dureza se midió con un durómetro Wilson bajo las siguientes condiciones:

Tabla 3: Condiciones para las pruebas de dureza

<b>Pruebas de Dureza</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Carga aplicada</b>	60 KGF
<b>Identador de carburo</b>	1/16
<b>Muestras</b>	5
<b>Tipo de dureza</b>	Rockwell B

## 3. Resultados y discusión

La primera etapa de análisis se centró en la evaluación dimensional de las piezas fabricadas en bronce. En el caso del diámetro interior nominal de 15 mm, se registró una contracción del 6.8% en la pieza verde y de hasta un 12% tras el sinterizado (pieza café), lo que evidencia una reducción progresiva asociada tanto al enfriamiento posterior a la impresión como al colapso parcial de la estructura durante la eliminación del aglutinante y la densificación. En contraste, los orificios de montaje de 3 mm presentaron contracciones más pronunciadas, del 17.23% en la pieza verde y del 34.5% en la pieza café, lo cual indica que las dimensiones reducidas y confinadas son más susceptibles a la pérdida de precisión geométrica. En el espesor de 3.85 mm se documentó una contracción de 4.67% en la pieza verde, mientras que la pieza café presentó una ligera expansión del 2.33% respecto a la dimensión de diseño. Este comportamiento irregular sugiere que el proceso de eliminación del aglutinante no fue homogéneo, generando zonas con diferente grado de densificación. Finalmente, en el diámetro exterior del engrane se identificó una expansión mínima, de 0.5% en la pieza verde y 0.046% en la pieza café, lo que refleja que las superficies externas expuestas tienden a conservar mejor la estabilidad dimensional en comparación con cavidades internas o geometrías de menor escala. Al no haberse podido continuar con el sinterizado de las piezas impresas de acero inoxidable 316L, se analiza la contracción dimensional de ambas piezas impresas en bronce y en acero inoxidable 316L para evaluar el comportamiento de los distintos materiales en la etapa de impresión, donde se muestra que la pieza impresa en acero inoxidable 316L experimentó una menor modificación volumétrica en comparación con la de bronce.

Tabla 4: Comparativa de contracción dimensional en piezas impresas de bronce vs acero inoxidable 316L

	<b>Diámetro central</b>	<b>Diámetro exterior</b>	<b>Espesor del cuerpo</b>	<b>Perforaciones de montaje</b>
<b>Acero inoxidable 316L</b>	-5.733%	0.46%	-15%	-0.75%
<b>Bronce</b>	-6.80%	0.50%	-17.23%	-4.67%

La caracterización mecánica mediante pruebas de dureza Rockwell B arrojó valores entre 49 y 64 HRB en cinco mediciones independientes. Esta dispersión relativamente amplia puede asociarse a variaciones locales en el grado de densificación y a la heterogeneidad superficial inducida por el proceso de debinding no controlado. Aunque los valores de dureza obtenidos se encuentran dentro del rango inferior reportado en la literatura para aleaciones de bronce sinterizado, los resultados confirman que la pieza adquirió propiedades mecánicas medibles y comparables con estudios previos, lo cual valida parcialmente la factibilidad del proceso.

Tabla 5: Muestras de dureza Rockwell B tomadas de una sola pieza

<b>Resultado de muestras de dureza Rockwell</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Resultado</b>
<b>1</b>	62
<b>2</b>	64
<b>3</b>	63
<b>4</b>	49

Tabla 6: Valores de dureza RB de referencia por Brad Peirson (2005)

Resultado de muestras de dureza Rockwell		
		Publicado [matweb]
<b>Metales</b>	RB	RB
<b>AA2024</b>	80.5	80
<b>Phosphor</b>	78.7	73
<b>Bronze</b>		
<b>Brass</b>	69.4	70
<b>Cast Iron</b>	100.8	100
<b>Ductile Cast Iron</b>	95.8	96
<b>Gray Cast Iron</b>	101.7	100

En cuanto a la evaluación cualitativa de la superficie, las piezas verdes mostraron una textura uniforme, con presencia visible de los patrones de relleno rectilíneo, pero sin defectos graves como delaminación, warping o sobre-extrusión. Los dientes del engrane conservaron una definición geométrica aceptable, mientras que las superficies planas superiores e inferiores mantuvieron un paralelismo adecuado. Tras el sinterizado, sin embargo, se observaron irregularidades más notorias: la coloración heterogénea evidenció zonas de oxidación superficial, mientras que la rugosidad aumentó debido a la eliminación no controlada del aglutinante polimérico. La presencia de porosidad y acumulación de residuos en ciertas áreas confirma que el proceso, al realizarse en mufla sin control de rampas, no permitió una densificación homogénea. Por otro lado, las piezas de acero inoxidable 316L exhibieron un acabado más mate y uniforme, con mayor definición en las líneas de deposición.



Figura 3: Pieza impresa de bronce

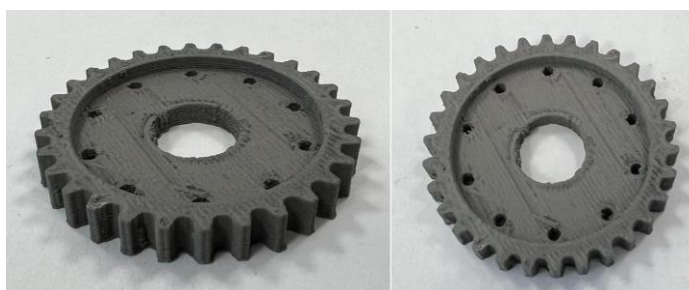


Figura 4: Pieza impresa de acero inoxidable 316L

El proceso de debinding permitió la eliminación parcial del aglutinante polimérico, pero la falta de control en la rampa de temperatura resultó en una eliminación no uniforme del material. Como consecuencia, se observaron irregularidades en la superficie de las piezas, incluyendo zonas con acumulación de residuos y una textura superficial heterogénea.

Además, la eliminación incompleta del aglutinante afectó la calidad del sinterizado posterior, ya que la presencia de residuos poliméricos puede generar defectos internos, como porosidad y burbujas, que comprometen la integridad estructural de las piezas. Este fenómeno fue particularmente evidente en las piezas de bronce, donde se observó una densificación no uniforme y una variabilidad en las propiedades mecánicas.



Figura 5: a) Frente y b) reverso de muestra de bronce sinterizada

De manera general, los resultados permiten identificar tendencias preliminares en el comportamiento dimensional y mecánico de piezas metálicas fabricadas mediante FDM y sinterizado. La contracción se presentó de forma más severa en cavidades internas y elementos geométricos reducidos, mientras que las superficies externas conservaron mejor la fidelidad dimensional. La dureza mostró variabilidad, lo que sugiere la necesidad de un mayor control en el proceso de sinterizado. Estos hallazgos, aunque limitados a una geometría particular, constituyen una primera aproximación que abre la puerta a futuros estudios orientados a la optimización del proceso, comparaciones con otras tecnologías de manufactura y validaciones con geometrías más complejas.

#### 4. Conclusiones

El presente trabajo constituye un estudio preliminar sobre la manufactura de piezas metálicas mediante el método de modelado por deposición fundida (FDM) y posterior sinterizado. Se logró la fabricación de un engrane de bronce con dimensiones de referencia de 50 mm de diámetro exterior, 15 mm de diámetro interior, 3.85 mm de espesor y perforaciones de 3 mm. El proceso de impresión se realizó en una impresora Creality Ender-3 S1 Pro, empleando parámetros de 235 °C de temperatura de extrusión, 60 °C de cama, altura de capa de 0.20 mm, velocidad de impresión de 40 mm/s, 90% de relleno rectilíneo y 120% de flujo de extrusión.

Los resultados mostraron contracciones dimensionales significativas, en especial en cavidades internas y perforaciones, alcanzando hasta un 34.5% de reducción respecto a las dimensiones de diseño. Los valores de dureza obtenidos oscilaron entre 49 y 64 HRB, lo que confirma que las piezas adquirieron propiedades mecánicas medibles, aunque con dispersión atribuida a la densificación no homogénea durante el sinterizado. El análisis superficial reveló irregularidades y porosidad asociadas a la eliminación no controlada del aglutinante en la mufla sin rampas programables.

Si bien en este trabajo se imprimieron piezas tanto en bronce como en acero inoxidable, únicamente el proceso de

sinterizado de las piezas de bronce pudo completarse debido a las limitaciones de temperatura del equipo utilizado. En este sentido, los resultados obtenidos permiten concluir que es factible fabricar piezas metálicas de bronce mediante FDM y sinterizado, pero que es necesario optimizar aspectos relacionados con la contracción dimensional, el control del debinding y la homogeneidad de la densificación.

Finalmente, debe señalarse que este estudio no constituye aún una comparación formal frente a métodos tradicionales como la manufactura CNC, sino que representa una aproximación inicial a la factibilidad del proceso. Para consolidar esta línea de investigación será indispensable evaluar geometrías adicionales, emplear hornos con control programable de rampas de calentamiento y realizar comparaciones sistemáticas con datos de la literatura y con otros métodos de manufactura.

## Referencias

- Al Abadi, H., Thai, H. T., Phuoc, N. V., & Ngo, V. Q. (2021). Effect of printing parameters on tensile, dynamic mechanical, and thermoelectric properties of FDM 3D printed ULTEM™ 9085 parts. *Additive Manufacturing*, 41, 101952.
- Brad Peirson, (2005). Use of Hardness Testing in Determining Processing Conditions and Ductility of Metal Alloys. School of Engineering Grand Valley State University. EGR 250 – Materials Science and Engineering Section 1
- Çevik, Ü., & Kam, M. (2020). A review study on mechanical properties of obtained products by FDM Method and Metal/Polymer Composite Filament Production. *Journal Of Nanomaterials*, Volume 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6187149>.
- Galantucci, L. M., Pellegrini, A., Guerra, M. G., & Lavecchia, F. (2022). 3D printing of parts using metal extrusion: An overview of shaping debinding and sintering technology. *Advanced Technologies & Materials*, 47(1), 25-32. <https://doi.org/10.24867/atm-2022-1-005>
- Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly filled polymers: A review and future perspectives. *Materials*, 11(5), 840.
- Liu, B., Wang, Y., Lin, Z., & Zhang, T. (2019). Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering. *Materials Letters*, 263, 127252.
- Matweb – Material Property Data, [www.matweb.com](http://www.matweb.com), June 12, 2005.
- Sadaf, M.; Bragaglia, M.; Siemenik Perše, L.; Nanni, F. (2024). Advancements in Metal Additive Manufacturing: A Comprehensive Review of Material Extrusion with Highly Filled Polymers. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(1), 14.
- Vallejo Castaño, D. (2023). Universidad Eia Ingeniería Mecánica. Envidado Manufactura De Estructuras 3d En Bronce Utilizando Fabricación Por Filamento Fundido Y Sinterizado.
- Wohlers, T. (2023). Wohlers Report 2023: Additive Manufacturing Statistics and Analysis. Wohlers Associates, Inc.