VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Desarrollo mediante CAD de una impresora 3D de metales a escala de laboratorio y de bajo costo

Development of a low-cost laboratory-scale 3D metal printer

Joseph Alejandro Aguilar Franco, Eric Noé Hernández Rodríguez*
División de Ingenierías Campus Irapuato – Salamanca, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto., México.
*email: noe.hernandez@ugto.mx

Resumen

La manufactura aditiva mediante fusión selectiva por láser (SLM) representa una tecnología con alto potencial para la fabricación de implantes biomédicos personalizados de aleaciones de magnesio; sin embargo, el elevado costo de los equipos comerciales limita su desarrollo en laboratorios de investigación. En este trabajo se presenta el diseño mediante software CAD de un prototipo de impresora 3D de metales a escala de laboratorio y de bajo costo, orientado al procesamiento de la aleación AZ31. El desarrollo comprendió la definición funcional, selección y modelado de los principales sistemas del equipo, incluyendo plataforma de fabricación, dosificación de polvos, cámara de fabricación con atmósfera controlada, sistema óptico basado en láser y Galvo-escáner, control de movimientos, programación y monitoreo. El ensamble virtual permitió verificar la compatibilidad entre componentes, optimizar el diseño antes de su manufactura y reducir costos y tiempos de desarrollo. El prototipo constituye una plataforma tecnológica para futuras investigaciones en manufactura aditiva de aleaciones de magnesio con aplicaciones biomédicas.

Palabras clave: Manufactura aditiva; Fusión selectiva por láser; Diseño asistido por computadora

1. Introducción

El desarrollo de implantes biomédicos temporales hechos a medida que puedan ser absorbidos por el cuerpo humano representa uno de los retos más importantes en la medicina regenerativa y la ingeniería de tejidos (Thomas et al., 2024; Wei et al., 2022). En este contexto, las aleaciones de magnesio representan uno de los sistemas más prometedores (Li et al. 2023), y dentro de él, la aleación AZ31 emerge como un material excepcional por su combinación única de biocompatibilidad, biodegradabilidad y propiedades mecánicas compatibles con el tejido óseo, ofreciendo una solución transformadora para implantes ortopédicos y dispositivos cardiovasculares temporales (Tourret et al., 2024). Sin embargo, su transición desde el laboratorio hacia aplicaciones clínicas requiere una comprensión profunda de los mecanismos que gobiernan su comportamiento funcional, lo cual se ha identificado como una brecha crítica en la ciencia de los materiales (Chen et al., 2024). Publicaciones previas señalan la falta de control sobre sus propiedades funcionales en ambientes reales, limitando su transición hacia aplicaciones clínicas seguras, confiables y reproducibles (Yin at al., 2024; Akhtar et al., 2024). La complejidad de esta problemática radica en la multiescalaridad y multivariablez de los procesos que relacionan procesamiento-estructura-propiedades-función (Raguraman et al., 2024; Zhang et al., 2023). Propiedades funcionales clave como velocidad de degradación, generación de gas, o integridad mecánica en medios fisiológicos están íntimamente ligadas con microestructura (tamaño de grano, textura cristalográfica, distribución de fases secundarias, etc.). Así, procesos de fabricación metálica usuales no son idóneos para abordar esta problemática de difícil respuesta, ya que ofrecen un margen limitado de control sobre estas variables (Deng et al., 2022). En cambio, la manufactura aditiva, específicamente la fusión selectiva por láser (SLM), permite acceder a regímenes de solidificación altamente no convencionales (descripción en protocolo anexo), siendo posible inducir estructuras refinadas, orientadas, y morfologías específicas, posicionándose como una tecnología disruptiva para la personalización de dispositivos biomédicos. Pese a su potencial, el uso de SLM con aleaciones de magnesio ha sido muy poco explorado debido a desafíos técnicos severos: la inflamabilidad del polvo de AZ31, su reactividad extrema, y la necesidad de atmósferas inertes rigurosas (Valipoorsalimi at al., 2023). Investigaciones recientes apenas comienzan a resolver estos problemas, pero aún no existe un cuerpo sistemático de conocimiento que vincule parámetros de proceso con estructura y propiedades funcionales. En consecuencia, la fabricación racional de dispositivos personalizados de Mg por SLM sigue sin consolidarse como una alternativa viable para aplicaciones biomédicas, lo cual constituye una oportunidad de investigación en la frontera de la ciencia (Lee & Kim, 2024). La SLM es una técnica de manufactura aditiva que utiliza un láser de alta potencia para fundir

selectivamente capas de polvo metálico, creando piezas tridimensionales con alta densidad y geometrías complejas (ver Figura 1) (ScienceDirect Topics, 2024). Los parámetros de proceso clave en SLM incluyen la potencia del láser, velocidad de escaneo, espaciado entre líneas, grosor de capa y temperatura de la plataforma, los cuales afectan microestructura y a su vez propiedades funcionales del material fabricado (Morales & Ávila, 2024).

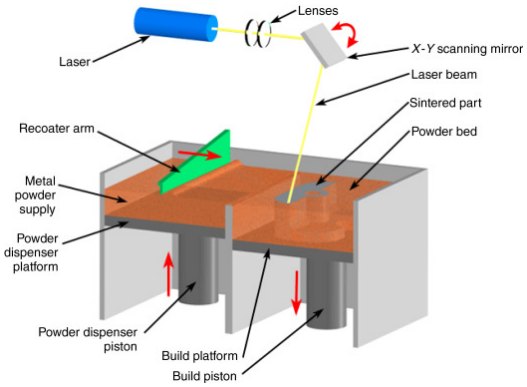


Figura 1. *Esquema del proceso SLM [14].*

Con la finalidad de realizar investigación científica sobre la fabricación de piezas de Mg mediante SLM, en el Grupo de Investigación en Materiales Avanzados de la DICIS – UG, se ha propuesto el diseño y construcción de un sistema experimental específico para impresión 3D de Mg por SLM, lo cual representa una innovación tecnológica habilitadora para la comunidad científica regional y nacional. La construcción de un sistema experimental se justifica en dos vertientes: la primera es por la necesidad de controlar la alta reactividad y volatilidad de AZ31 (Chen & Chen, 2024), optimizar parámetros específicos de fabricación para esta aleación y, fabricar componentes biomédicos personalizados con precisión y propiedades adecuadas y, la segunda es por el alto costo de los sistemas industriales comerciales (no menor a los 100,000 USD) que además están optimizados para los requerimientos de proceso de aleaciones tradicionales, como acero y titanio (Dallinger et al., 2024). Por tanto, en este trabajo enmarcado en el Verano de la Ciencia 2026 de la UG se desarrolló empleando herramientas CAD el prototipo de impresora 3D para Mg, buscando simplicidad de diseño, accesibilidad de componentes en el mercado, manufactura sencilla de componentes y bajo costo.

2. Desarrollo

Los requerimientos generales de una impresora 3D de metales que debe de satisfacer el diseño son: plataforma de fabricación, sistema de dosificación de polvos, sistema de suministro de energía térmica, cámara de fabricación, sistema de generación de movimientos y sincronización, software de programación y control, y sensores de parámetros de proceso. A continuación se describe la función que debe de cumplir cada sistema y con base en ello, es que se seleccionaron los componentes de cada uno.

a) **Plataforma de fabricación:** Sobre ella se deposita una capa fina de los polvos de metal y se hace incidir el láser de manera focalizada, fundiendo los polvos y generando una capa sólida de la pieza que se imprime. Posteriormente, la plataforma se desplaza verticalmente para depositar una nueva capa de polvos y repetir el proceso hasta fabricar la pieza completa, capa por capa. La plataforma debe de poseer una superficie plana capaz de tener un desplazamiento vertical controlado con una resolución no menor de 10 μm, además de ser un material que soporte altas temperaturas.

b) **Sistema de dosificación de polvos**: Este deberá tener 2 subsistemas principales: contenedor de los polvos finos de metal y dispersor de los polvos. El contenedor deberá de tener la capacidad de alojar la cantidad suficiente de polvos para el proceso de impresión, evitando derramamientos, y proporcionando una salida controlada de los mismos. El dispersor cumplirá con la función de mover los polvos que salen del contenedor hacia la plataforma de fabricación y generar una capa fina y uniforme.

c) **Sistema de suministro de energía térmica:** Debe de componerse de una fuente láser que proporciona un haz de alta potencia, suficiente para lograr la fundición de los polvos metálicos sobre la plataforma de fabricación. Para lograr la incidencia del haz en una región determinada y producir la geometría de la pieza a imprimir es necesario contar con un sistema óptico que permita dirigir el haz láser de forma controlada y estable, generando recorridos del haz (y por tanto fundición de polvos) de acuerdo con la geometría de la pieza final.

d) **Cámara de fabricación:** Ya que la aplicación del prototipo a construir es para la fabricación de piezas de magnesio, y este material es altamente reactivo con los gases ambientales, es necesario realizar el proceso de fabricación en un ambiente controlado, lo que genera la necesidad de una cámara de fabricación que permita la introducción de gas inerte y el aislamiento con el exterior, además del sensado de parámetros de proceso.

e) **Sistema de control de movimientos y sincronización:** Es necesario desarrollar un sistema que comprenda elementos mecánicos, electromecánicos, electrónicos y de control que permitan realizar diferentes tareas de manera automatizada e integrada, como la introducción de gases en la cámara, la generación de la capa de polvo sobre la plataforma de fabricación, el movimiento de la plataforma de fabricación, el movimiento del conjunto de espejos del sistema óptico para mover el haz láser y generar patrones de fundición.

f) **Software de programación y control**: Este deberá de seccionar en capas la geometría sólida de la pieza a imprimir, para generar los patrones de barrido de láser durante la fabricación capa por capa, además, deberá de controlar el movimiento del dosificador de polvos, la plataforma de fabricación, el encendido/apagado del láser y el movimiento de los espejos reflectores del haz, adicionalmente deberá recoger y mostrar las variables de proceso enviadas por los diferentes sensores.

g) **Sensores de parámetros de proceso:** Aquellos que serán necesarios son sensores de temperatura, de partículas de oxígeno, de chispa o puntos calientes y flujo de gases.

Una vez identificados los sistemas necesarios, y con su función definida, se procedió a hacer una elección de los componentes que están disponibles en el mercado y que cumplen con los requerimientos; mientras que muchos de los elementos serán fabricados, principalmente mecánicos, por lo que fueron diseñados. Todos los elementos del prototipo fueron modelados en software CAD individualmente, y después fueron ensamblados ahí mismo. La integración permitió observar, corregir y retroalimentar características de cada elemento, generando al final un diseño funcional y factible, siempre con referencia a estándares y normas internacionales, buscando simplicidad de diseño y de operación, y bajo costo de fabricación.

3. Resultados

3.1 Selección de componentes disponibles comercialmente.

La idea de partida para el desarrollo del prototipo de impresora 3D fue el requerimiento de lograr impresiones con un volumen máximo de 2.54 cm x 2.54 cm x 2.54 cm, con esto en mente, se buscaron y seleccionaron componentes disponibles en el mercado. La Tabla 1 muestra una lista de los componentes que pudieron conseguirse comercialmente y que satisfacen los requerimientos para la construcción del prototipo. Este fue el punto de partida y uno de los más relevantes, ya que sus características y dimensiones definieron el diseño de los demás elementos a fabricar y ensamblar.

***Tabla 1**. Componentes disponibles comercialmente y que fueron seleccionados de acuerdo con las características requeridas para el prototipo.*

Sistema	Componente	Característica principal
Plataforma de fabricación	Motor a pasos y riel de deslizamiento	Resolución 3.6 micrómetro/paso, carrera de 50 mm.
	Placa de acéro inoxidable	Ensamble robusto.

Sistema de dosificación de polvos	Motor a pasos y riel de deslizamiento	Resolución 3.6 micrómetro/paso, carrera de 200 mm.
	Sello de poliuretano	Sección transversal circular, OD 2 mm.
Sistema de suministro de energía térmica	Láser de industrial	Potencia de 100 W, longitud de onda 1023 nm, operación pulsada, diámetro 7 mm.
	Galvo scaner	Apertura 10 mm, rango de escaneo +- 15°, longitud de onda 1064 nm.
	Mirilla circular	OD 78 mm, transparencia a 1064 nm.
	Torreta y housing para láser	Precisión de alineación del láser.
Cámara de fabricación	Acrílico	Fácil maquinado, espesor de 12 mm.
	Sello de poliuretano	Sección transversal circular, OD 4 mm.
	Bisagras	Compactas, fácil instalación.
	Conectores pasa muros	0.75 in, base plate a KF 25.
	Ventana óptica rectangular	Bloqueo de 1064 nm, 100 x 250 mm.
Sistema de control de movimientos y sincronización	Arduino	Integración de todos los sistemas de control y monitoreo.
Software de programación y control	Labview	Integración de todos los sistemas de control y monitoreo.
Sensores de parámetros de proceso	Sensor de temperatura Omega	Sensado fino de temperatura.
	Sensor de nivel de oxígeno	Rango de medición 0 - 30% Vol.

3.2 Diseño de componentes.

Una vez analizados los componentes que se listan en la Tabla 1, y siguiendo el objetivo del volumen de impresión ya mencionado, se decidió que la cámara de fabricación tuviera dimensiones de 40 cm de largo, 30 cm de ancho y 30 cm de alto, hecha en acrílico de 12 mm de espesor, lo cual permite un ensamble robusto y también el maquinado de diferentes puertos para la instalación de diversos componentes, ver la Figura 2. En la tapa superior se dejó un puerto para la instalación de una mirilla para el ingreso del haz láser hasta la plataforma de fabricación, y también en la cara interna a la cámara se diseñó un canal para la instalación de un o-ring de 4 mm que hace sello hermético con el borde superior de las caras laterales, frontal y posterior; en la tapa posterior se dejaron 8 puertos de 0.75 in. para la instalación de pasamuros para el sensor de oxígeno, sensor de temperatura, detector de chispa y puntos calientes, ductos de circulación de gas inerte y sistema de evacuación de gases atmosféricos; en la tapa frontal se dejó un puerto para la instalación de una ventana óptica de 25 mm x 10 mm para monitoreo visual del proceso durante la fabricación; en la tapa inferior se realizaron diferentes perforaciones para sujeción de elementos dentro de la cámara, así como de una placa de soporte donde se alojan el sistema de dosificación de polvos y la plataforma de fabricación. Se diseñó que las tapas laterales, frontal, posterior e inferior de la cámara estén pegadas desde fábrica para hacer un cierre hermético entre ellas, mientras que la tapa superior por diseño cuenta con bisagras y cerraduras para acceder al interior de la cámara, y mediante la instalación del o-ring ya mencionado hacer un sellado completo cuando esta se cierra.

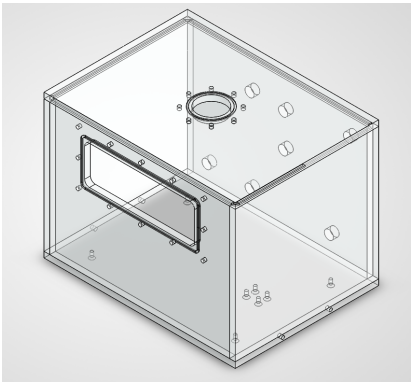


***Figura 2**. Imagen que muestra una vista tridimensional de la cámara de fabricación diseñada y los principales puertos de conexión de componentes.*

El sistema de dosificación de polvos, ver Figura 3, se diseñó en forma de tolva cónica que puede contener hasta 0.5 kg de polvo metálico, con una ranura en la parte inferior que permite su salida de forma controlada; también, en la parte inferior tiene instaladas 2 barras de poliuretano de sección circular con diámetros de 4 mm. Esta tolva está montada sobre un deslizador mecánico controlado por un motor a pasos que permite dosificar polvo en la plataforma de fabricación, y mediante las barras de poliuretano que son paralelas a la superficie de la plataforma, formar una capa delgada y uniforme de los polvos. El diseño se desarolló de tal manera que los componentes que no existen en el mercado pudieran ser fabricados mediante impresión 3D en PLA.

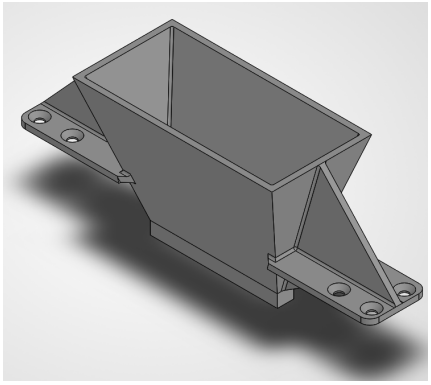


***Figura 3**. Diseño de la tolva del dosificador de polvos.*

La plataforma de fabricación fue pensada para alojar objetos impresos con un área de base de hasta 2.54 cm x 2.54 cm por lo que se diseñó de 5 cm x 5 cm, con tolerancia suficiente para las dimensiones de impresión. Su construcción por diseño será en acero inoxidable 316, ya que se debe de maquinar una surperficie con alta planicidad para que la capa de polvos sea uniforme, y también para soportar las altas temperaturas y disipar el calor debido a la incidencia del haz láser sobre las capas de polvo. Esta plataforma está montada sobre un riel vertical deslizante con resolución de 3.5 micrómetros/paso controlado por un motor a pasos, que permite moverse hacia abajo con cada capa fabricada del objeto a imprimir. Diferentes elementos de montaje y sujeción entre la placa y el riel de deslizamiento fueron diseñados para poder imprimirse en PLA, ver Figura 4.

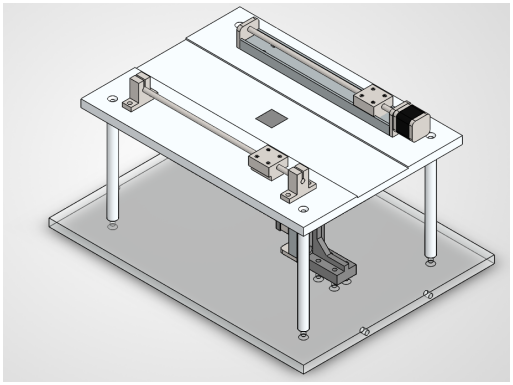


***Figura 4**. Plataforma de fabricación, riel de deslizamientos y elementos de montaje y sujeción.*

Tanto la plataforma de fabricación como el sistema de dosificación de polvos están montados en una placa de soporte que a su vez está sujeta mediante pilares de aluminio con diámetro de 0.5 in. a la tapa inferior de la cámara de acrílico. Su construcción se proyectó en placa de aluminio con espesor de 0.5 in. por la facilidad de maquinado así como su resistencia al ambiente de fabricación. Sus dimensiones serán 35 cm de largo y 25 cm de ancho, ver la Figura 5.

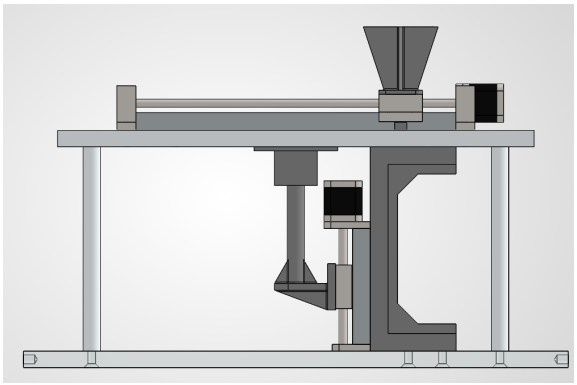


***Figura 5**. Ensamble del dosificador de polvos y la plataforma de fabricación en la placa de soporte.*

El suministro de energía térmica para la fundición de los polvos en la plataforma de fabricación se proporcionará mediante un láser industrial de 100 W de potencia con longitud de onda de 1064 nm y diámetro de haz de 7 mm. En el diseño se consideró que con la finalidad de realizar un prototipo simplificado y de bajo costo el cabezal láser esté por fuera de la cámara de fabricación, por lo que es necesario un sistema óptico de direccionamiento del haz y un sistema mecánico de alojamiento del cabezal. El cabezal será montado en un hounsing que a su vez está sujeto en una torreta que permite el ajuste preciso de la altura de salida del haz, haciéndolo incidir sobre el espejo de entrada de un Galvo-escáner. A su vez, el Galvo-escáner está sujeto de manera perpendicular y directamente por arriba de la mirilla colocada en la tapa superior de la caja de acrílico, así, el haz emerge por su espejo de salida, se dirije a la plataforma de fabricación y es barrido sobre la capa de polvos en un patron predefinido para imprimir capa por capa un sólido. En la Figura 6 se muestra la disposición del láser y el Galvo-escaner con respecto de la cámara de fabricación.

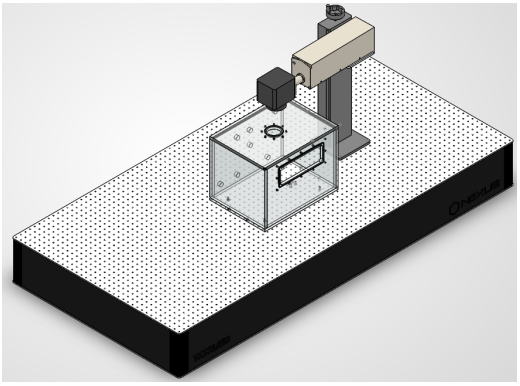


***Figura 6**. Disposición del láser y el Galvo-escáner con respecto de la caja de acrílico.*

3.3 Sistema de programación y control

Para el control de los motores a pasos, capturar la información de los sensores y sincronisar los procesos requeridos para la impresión, se plantea el uso de una tarjeta Arduino® como elemento principal de interfaz entre la computadora y los diferentes componentes actuantes del prototipo (motores, láser, sensores, etc.). Para la programación se desarrolla un programa en Labview® que permite realizar diferentes tareas como son: ingreso por parte del usuario de la geometría de la pieza a imprimir; seccionamiento en capas de la pieza (permitiendo definir espesor de capa); generación de código xy para su transmisión al Galvo-escáner y controlar el barrido del láser (permitiendo definir tamaño de paso del barrido, velocidad de barrido, número de repeticiones, solapamiento entre barridos); encendido, apagado y potencia del láser; movimiento de la plataforma de fabricación (permitiendo definir el tamaño de paso de desplazamiento); movimiento de el dosificador de polvo (permitiendo la programación de la velocidad de dosificación; además de mostrar diferentes variables de proceso como temperatura, humedad y nivel de oxígeno. La figura 7 muestra una vista completa del prototipo diseñado en su forma final.

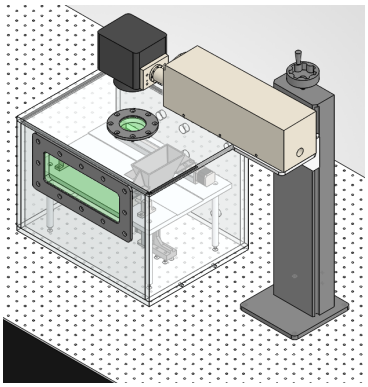


***Figura 7**. Vista completa del prototipo de impresora 3D de metales desarrollado.*

En la actualidad la mayoría de los componentes seleccionados para compra ya han sido adquiridos y aquellos que fueron diseñados ya están en proceso de fabricación. En este trabajo se mostró el alto valor que tiene el diseño de una máquina, en este caso un prototipo de impresora 3D de metales, empleando herramientas CAD, ya que permite dimensionar, modelar, calcular y probar ensambles de manera virtual antes de la realización física, exponiendo posibles discordancias entre componentes o de funcionamiento, permitiendo corregir antes de manufacturar o ensamblar, lo cual produce eficiencia económica y ahorro de tiempo.

4. Conclusiones

El desarrollo mediante herramientas CAD de un prototipo de impresora 3D de metales permitió establecer una base sólida para la futura construcción de un sistema experimental de fusión selectiva por láser destinado al procesamiento de aleaciones de magnesio. El modelado tridimensional de los componentes y su ensamble virtual facilitaron la evaluación de la compatibilidad mecánica y funcional de los diferentes sistemas, permitiendo identificar y corregir posibles interferencias antes de la etapa de manufactura. Asimismo, la selección de componentes comerciales y el diseño de piezas fabricables mediante procesos convencionales e impresión 3D contribuyen a reducir significativamente el costo y la complejidad del desarrollo del equipo. El prototipo diseñado integra los elementos esenciales para controlar el proceso de fabricación en atmósfera inerte y constituye una plataforma tecnológica flexible para investigación. Finalmente, este trabajo demuestra que el diseño asistido por computadora es una herramienta fundamental para optimizar el desarrollo de equipos científicos especializados, disminuyendo tiempos, costos y riesgos durante su implementación física.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por SECIHTI en el marco de la convocatoria Ciencia Básica y de Frontera dentro del proyecto CBF-2025-I-3362. Joseph Alejandro Aguilar Franco agradece la beca proporcionada por el programa XXXI Verano de la Ciencia de la Universidad de Guanajuato.

Bibliografía

Akhtar, M., Samiuddin, M., Muzamil, M., Siddiqui, M. A., Khan, R., Alsaleh, N. A., Siddiqui, A. K., Djuansjah, J., & Majeed, A. (2024). *Materials*, 17(9), 1959. https://doi.org/10.3390/ma17091959

Badkoobeh, M., Venkateswarlu, K., & Raj, R. (2023). *Frontiers in Materials*, 10, 11254538. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.11254538

Chen, J., & Chen, B. (2024). *Materials*, 17(15), 3851. https://doi.org/10.3390/ma17153851

Dallinger, A., Klemens, H., & Gollner, J. (2023). *Additive Manufacturing*, 68, 102847. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.102847

Deng, Y., Liu, Y., & Wang, D. (2022). *Materials Characterization*, 189, 111980. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111980

Lee, T., & Kim, H. (2024). *Phys.org*. https://phys.org/news/2024-02-employ-artificial-intelligence-secrets-magnesium.html

Li, K., Ji, C., Bai, S., Jiang, B., & Pan, F. (2023). *Journal of Materials Science & Technology*, 154, 65–93. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.10.003

Morales, L., & Ávila, R. (2024). *Metals*, 14(9), 1081. https://doi.org/10.3390/met14091081

Raguraman, S., Sharma Priyadarshini, M., Nguyen, T., McGovern, R., Kim, A., Griebel, A. J., Clancy, P., & Weihs, T. P. (2024). *Materials & Design*, 225, 111312. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111312

ScienceDirect Topics. (2024). *Selective laser melting (SLM)*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819731-7.00001-1

Thomas, K. K., Zafar, M. N., Pitt, W. G., & Husseini, G. A. (2024). *Applied Sciences*, 14(1), 10. https://doi.org/10.3390/app14010010

Tourret, D., Tavakoli, R., Boccardo, A. D., Boukellal, A. K., Li, M., & Molina-Aldareguia, J. (2024). *Acta Materialia*, 245, 118456. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118456

Valipoorsalimi, P., Sari, Y. A., & Pekguleryuz, M. (2023). *arXiv preprint*, arXiv:2305.12060. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.12060

Wei, X., Ma, S., Meng, J., Qing, H., & Zhao, Q. (2022). *Materials Science and Engineering: C*, 135, 112597. https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112597

Yin, B., Liu, J., Peng, B., Zhou, M., Liu, B., Ma, X., Wang, C., Wen, P., Tian, Y., & Zheng, Y. (2024). *Journal of Magnesium and Alloys*, 12, 1367–1385. https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.09.007

Zhang, Y., Li, H., & Chen, X. (2023). *Journal of Magnesium and Alloys*, 11(4), 1234–1245. https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.09.007