

# Modelado del proceso de fusión selectiva por láser en aleaciones de aluminio

**Daniel García, Luis A. Reyes, Roberto Cabriales, Octavio García**

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, Apodaca, N.L., México.  
correo electrónico autor de correspondencia: luis.reyessr@uanl.edu.mx

## **RESUMEN**

*La industria aeronáutica ha evolucionado en respuesta a la creciente demanda de diseños y materiales avanzados, buscando aeronaves más ligeras, rápidas, resistentes y con mayor autonomía. La técnica de fusión selectiva por láser (SLM, por sus siglas en inglés Selective Laser Melting) es una tecnología de manufactura aditiva que utiliza un láser de alta densidad de potencia para fundir polvos metálicos en capas delgadas sobre una plataforma de construcción. La estabilidad de la alberca de fusión es fundamental para definir la microestructura, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de las piezas fabricadas mediante SLM. En esta investigación, se generó una evaluación experimental y numérica de la manufactura aditiva del AlSi10Mg mediante la técnica de fusión selectiva por láser. Se observó un buen acercamiento de los modelos numéricos con respecto los resultados experimentales. Las simulaciones de microestructura proporcionaron información detallada sobre el tamaño y la orientación de los granos, factores que afectan directamente las propiedades finales del material. La distribución de tamaños de grano posee una relación directa con las condiciones de fabricación y su desempeño mecánico. El presente estudio explora la fabricación y modelado de aleaciones ligeras a través de técnicas innovadoras de impresión aditiva.*

## **PALABRAS CLAVE**

AlSi10Mg, manufactura aditiva, microestructura.

## **ABSTRACT**

*The aerospace industry has evolved in response to the growing demand for advanced designs and materials, seeking lighter, faster, stronger and more autonomous aircraft. Selective Laser Melting (SLM) is an additive manufacturing technology that uses a high-power density laser to melt metal powders in thin layers on a build platform. The stability of the melting pool is critical in defining the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of parts fabricated using SLM. In this research, an experimental and numerical evaluation of the additive manufacturing of AlSi10Mg by selective laser melting technique was generated. A good approach of numerical models with respect to the experimental results was observed. The microstructure simulations provided detailed information on grain size and orientation, factors that directly affect the final material properties. The grain size distribution has a direct relationship with the manufacturing conditions and its mechanical performance. The present study explores the fabrication and modeling of light alloys through innovative additive printing techniques.*

## **KEYWORDS**

AlSi10Mg, additive manufacturing, microstructure.

## **INTRODUCCIÓN**

La industria aeronáutica ha evolucionado en respuesta a la creciente demanda de materiales de alto desempeño, buscando aeronaves más ligeras, rápidas, resistentes y con mayor autonomía. Esta evolución ha implicado el desarrollo de nuevos materiales, así como métodos de manufactura novedosos. La manufactura aditiva es un proceso que permite la construcción de

objetos mediante la adición de material capa por capa. Esta tecnología se ha incorporado a diversas industrias recontentamente, posibilitado la creación de piezas complejas para una amplia gama de aplicaciones.<sup>1</sup> Una de las principales ventajas de la manufactura aditiva radica en su capacidad de adaptación geométrica y la posibilidad de incluir distintos materiales.

La técnica de fusión selectiva por láser (SLM) es una tecnología de manufactura aditiva que utiliza un láser de alta potencia para fundir polvos metálicos en capas delgadas sobre una plataforma de construcción.<sup>2</sup> La sección transversal de la pieza 3D se forma al fundir selectivamente y solidificar los polvos metálicos en cada capa. El proceso SLM generalmente utiliza polvos con tamaños de partícula que van de 20  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  y espesores de capa de 20  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ .

Durante la manufactura aditiva de componentes metálicos, la estabilidad de la alberca de fusión es fundamental para definir la microestructura, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de las piezas fabricadas. La alberca de fusión corresponde a la región de metal sobrecalentado y fundido que se forma cerca de la interfaz entre el láser y el material base, ver figura 1.

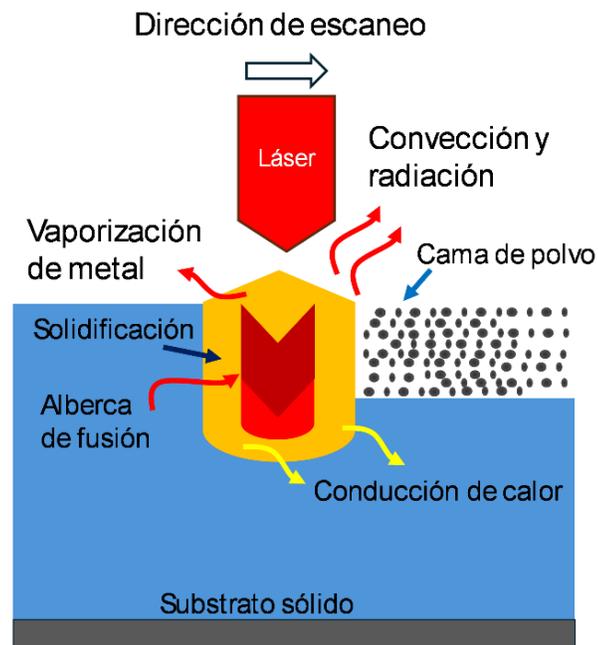


Fig. 1. Esquema de alberca de fusión durante el proceso SLM.

La alberca de fusión es termodinámicamente inestable, ya que su forma y energía interna cambian continuamente debido a la transferencia de calor y a la interacción líquido-sólido entre las paredes y el aporte del polvo metálico. Este polvo es suministrado en la alberca, mientras el láser proporciona la energía necesaria para mantenerla activa. La alberca de fusión constituye el punto inicial de formación de la parte sólida, su morfología, temperatura y comportamiento son esenciales para lograr un control de calidad eficiente.<sup>3</sup>

La implementación de modelos numéricos en SLM ha facilitado la predicción del procesamiento de materiales, reduciendo los tiempos de experimentación. ANSYS Additive es una plataforma de simulación diseñada específicamente para el campo de la manufactura aditiva de metales. Esta herramienta ofrece un entorno de exploración enfocado en identificar los parámetros de proceso óptimos para equipos y materiales. Se incluye la generación de estructuras de soporte optimizadas basadas en estados de esfuerzos, definiendo criterios como la ubicación y el grosor de los soportes.

La aleación AlSi10Mg es una aleación de aluminio utilizada principalmente en la industria automotriz y aeroespacial, se utiliza principalmente en sistemas de engranajes, carcasas y soportes sometidos a cargas elevadas. Recientemente, se han desarrollado investigaciones para evaluar su comportamiento térmico y mecánico durante el proceso SLM, por ejemplo,<sup>4</sup> realizaron pruebas del material AlSi10Mg fabricando muestras mediante fusión selectiva por láser en un equipo SLM 280 2.0, la manufactura capa por capa se realizó con una separación de láser de 150  $\mu\text{m}$ , un espesor de capa de 20  $\mu\text{m}$  y 30  $\mu\text{m}$ , considerando un diámetro del punto de láser de 100  $\mu\text{m}$ . La respuesta mecánica obtenida en las pruebas se comparó con pruebas de piezas obtenidas mediante métodos tradicionales.<sup>5</sup> realizaron un análisis de control de muestras con el objetivo de eliminar valores atípicos (observaciones inusuales) que pudieran influir de manera desproporcionada en los resultados de impresión, se presentan los valores de la densidad relativa obtenidos y los parámetros utilizados en cada experimento.

Manufacturó mediante SLM un compuesto de SiC/AlSi10Mg, se evaluaron diferentes parámetros de fabricación, así como la densidad de energía del láser.<sup>6</sup> Bajo estas condiciones el compuesto de AlSi10Mg/SiC obtuvo un incremento de resistencia entre 50% - 65% comparado con el material base. Las pruebas con mayor densidad de energía láser tuvieron un incremento del 28% comparado con las pruebas con baja densidad de energía láser.<sup>7</sup> realizó un modelo numérico para obtener los tamaños de las albercas de fusión, evaluando diferentes valores de impresión como la velocidad y potencia. En la presente investigación, se generó una evaluación experimental y numérica de la manufactura aditiva del AlSi10Mg mediante la técnica de fusión selectiva por láser. Se observó un buen acercamiento de modelos numéricos con respecto los resultados experimentales de las albercas de fusión. Así mismo, se logró validar la influencia de los parámetros de fabricación en la calidad de impresión. El presente estudio explora el desarrollo de nuevas metodologías de modelado en la impresión de aleaciones metálicas ligeras para su potencial aplicación en el sector aeronáutico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de fabricación del AlSi10Mg se desarrolló mediante un equipo SLM 280 HL, este equipo cuenta con un láser de onda continua Ytterbium IPG que opera a una longitud de 1064 nm, posee una potencia nominal de 400 W y un diámetro de haz de 70  $\mu\text{m}$ , garantizando alta precisión en la consolidación del material.<sup>8</sup> En la figura 2 se observa el equipo utilizado durante la impresión de muestras de AlSi10Mg.

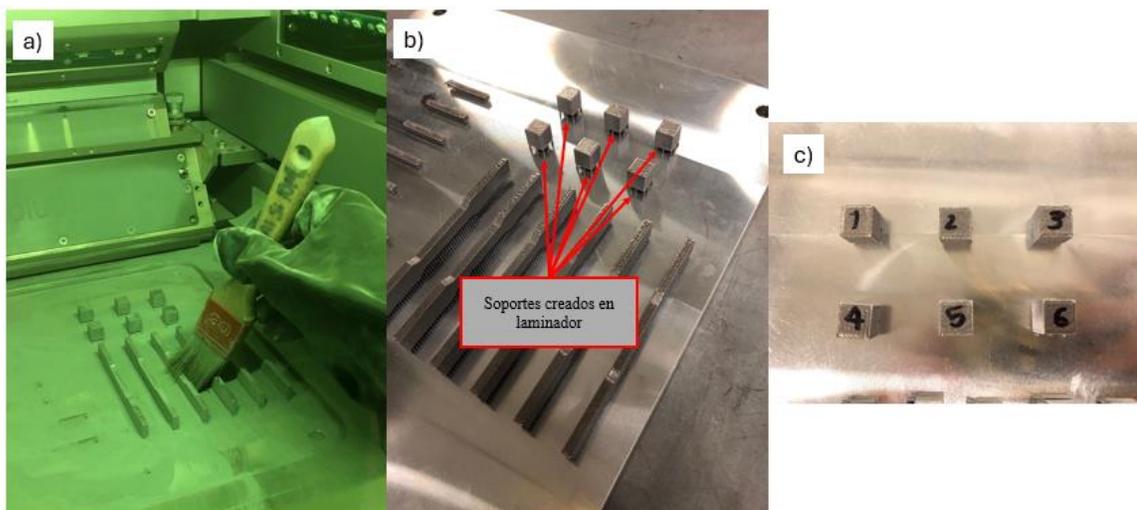


Fig. 2. Impresión mediante fusión selectiva por láser en SLM 280 HL (a) limpieza de polvo, (b) generación de soportes y (c) identificación de muestras.

El proceso de impresión incluye la creación de un modelo CAD, la generación del código G que la impresora seguirá para crear la pieza capa por capa, así como la transferencia de datos a la máquina de impresión, donde se ajusta el posicionamiento de la pieza con los parámetros de impresión y se inicia la fabricación. Los modelos CAD fueron diseñados utilizando el software Solidworks 2023. El procesamiento del archivo STL se realizó mediante el laminador Materialise, el cual permite generar el código G necesario para la fabricación de las piezas.

### Preparación de polvos

Durante el proceso de fabricación, se implementaron controles térmicos y atmosféricos, el polvo fue calentado a una temperatura constante de 200 °C, mientras que la cámara de fabricación se purgó con gas argón, asegurando una concentración de oxígeno inferior al 0.2%. Estas condiciones optimizadas minimizan las inclusiones de oxígeno, mejorando la calidad final de las piezas y la reducción de defectos asociados a la oxidación. La aleación AlSi10Mg con un tamaño promedio de partícula de 24.66 µm, se sometió a un tratamiento de cribado mediante un sistema vibratorio con duración entre 20-40 minutos. El polvo procesado fue recolectado en un contenedor con capacidad para 5 kg, el cual se encuentra en la parte superior de la máquina SLM 280 HL, desde esta posición, el material se transfiere a una tolva con capacidad de 80 kg que suministra el polvo necesario para la fabricación durante el proceso de impresión, garantizando un flujo continuo y eficiente del material.

### Impresión de especímenes

Se generaron especímenes de AlSi10Mg cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma ASTM E407. Para la evaluación de la microestructura se generaron cubos de 10 mm de lado. Se identificaron los factores más influyentes del proceso de impresión centrándose en la potencia del láser  $P$ , la velocidad de escaneo  $V$  y el plano focal del láser  $F$ , donde se identificaron los parámetros de potencia de 400 W, velocidad de 1800 mm/s y plano focal de 0 mm. Adicionalmente, se seleccionó un espesor de capa de 30 µm y un ángulo de rotación de 67° entre cada capa durante la fabricación. Así mismo, la cama de fabricación se mantuvo a una temperatura constante de 200 °C para garantizar condiciones óptimas de impresión.

### Densidad relativa

Se realizó el cálculo de la densidad relativa de las piezas impresas utilizando los parámetros de fabricación mencionados anteriormente.

$$RD = 98.98 + 8.63 \times 10^{-4}P + 1.56 \times 10^{-4}V - 0.384 F \quad (1)$$

Donde el termino RD hace referencia a la densidad relativa obtenida. Esta comparación facilitará la evaluación de la correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales, respaldando la validez de los parámetros seleccionados. Al sustituir estos valores en la ecuación 1, se obtiene un valor calculado de densidad relativa (RD) del 99.606%.<sup>9</sup>

La densidad relativa de los componentes manufacturados de AlSi10Mg mediante fusión selectiva por láser fue determinada siguiendo la prueba preliminar estándar ASTM B962, basada en el método de Arquímedes. Para las mediciones se utilizó una balanza OHAUS Discovery, con una resolución de  $1 \times 10^{-6}$  kg. Como medios auxiliares, se empleó aceite de silicona con una viscosidad entre 20 y 65 cSt, para la impregnación de la muestra y agua desionizada con un 0.1% en peso ( $\rho_x$ ) como fluido durante las mediciones de masa.

La densidad relativa experimental se determina utilizando la ecuación:

$$RD = \frac{A \rho_w}{\rho_r(A-B)} \quad (2)$$

Donde  $\rho_r$  es la densidad de referencia de la muestra, establecida en 2.67 g/cm<sup>3</sup>, que corresponde a la densidad teórica de la aleación AlSi10Mg en ausencia de porosidad. La densidad del agua  $\rho_w$  es la medida a la temperatura registrada durante el ensayo.  $A$  es la masa de la muestra pesada en aire y  $B$  es la masa de la muestra pesada en agua, considerando la tara del soporte utilizado.

Este enfoque es aplicable para componentes manufacturados con una porosidad inferior al 2%, donde se busca obtener mediciones precisas basadas únicamente en las propiedades intrínsecas del material bajo condiciones controladas.<sup>10</sup>

### Modelo numérico

El modelo numérico se desarrolló mediante la interfaz ANSYS Additive. Esta interfaz permite evaluar el comportamiento de la alberca de fusión durante el proceso SLM bajo condiciones de procesamiento seleccionadas. Se consideraron dos tipos de parámetros de entrada: parámetros constantes y variables paramétricas. Los parámetros constantes incluyeron valores como la temperatura de la placa base, el espesor de la capa y el diámetro del haz láser, los cuales permanecieron fijos a lo largo del análisis. Por otro lado, las variables paramétricas, como la potencia del láser y la velocidad de escaneo, fueron ajustadas dentro de un rango específico para evaluar su influencia en las características clave de la alberca de fusión. El desarrollo del modelo siguió un enfoque metódico, definiendo el dominio del problema, que incluye la geometría del material y la trayectoria del láser, se discretizó utilizando una malla regular refinada. Esto permitió simular el comportamiento dinámico de la alberca de fusión a lo largo del cordón generado por el láser. Durante la simulación, se analizaron diversas combinaciones de parámetros de potencia y velocidad, lo que permitió observar cómo estas variables influyen en las dimensiones y estabilidad de la alberca de fusión, tales como su profundidad, ancho y longitud. El modelo numérico consistió en la representación de un cordón único durante la fabricación SLM, considerando el ancho, la longitud y la profundidad de la alberca de fusión, ver figura 3.

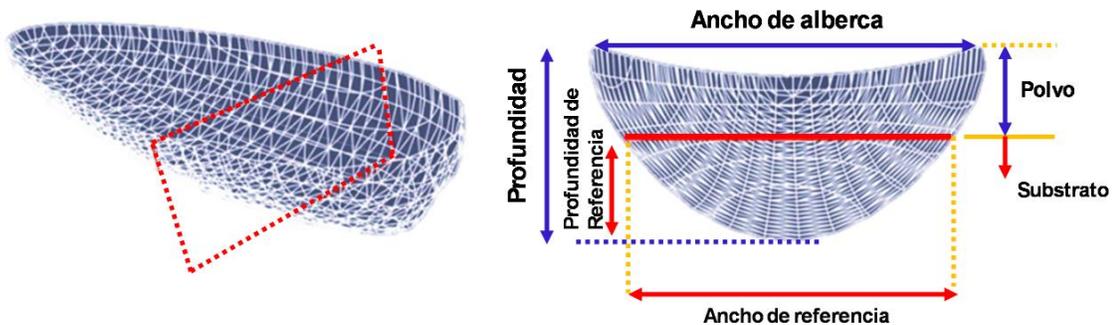


Fig. 3 Referencia geométrica de la alberca de fusión.

El espesor de la capa, en el contexto de una simulación de cordón único, representa la cantidad de material que se añade a cada capa durante el proceso de fabricación. Para comparar de manera adecuada los experimentos de cordón único con los resultados de la simulación, es esencial que el valor ingresado para el espesor de la capa refleje esta condición. Las dimensiones fueron promediadas a lo largo del cordón, generando datos de salida con la evolución detallada de las dimensiones de la alberca de fusión para cada juego de parámetros, como la potencia del láser y la velocidad de escaneo. La profundidad de referencia se define como la diferencia entre la profundidad total de la alberca de fusión y el espesor de la capa, es decir, la profundidad medida desde la base de la primera capa. El ancho de referencia, por su parte, se refiere al ancho medido en la base de la primera capa, donde comienza el polvo.

El modelo numérico microestructural del material AlSi10Mg considera las características de la alberca de fusión, las entradas térmicas y parámetros del proceso. La orientación de los granos del material se genera en tres planos (XY, XZ y YZ). Además, se proporciona la distribución del tamaño de grano y la distribución del ángulo de orientación en forma gráfica, utilizando el método de equivalencia de círculos para el tamaño de grano y un mapa de orientación para los planos evaluados. En el modelo se utilizó una función para generar el mismo patrón de nucleación bajo

un conjunto específico de condiciones del proceso. En el proceso SLM, debido a los ciclos repetidos de calentamiento, la microestructura resultante varía según los parámetros del proceso, lo que genera diferencias en las propiedades mecánicas.<sup>11</sup>

La figura 4 muestra la configuración geométrica para la simulación de microestructura. En la predicción microestructural, inicialmente se realiza una solución térmica de una geometría en forma de hexaedro para determinar la tasa de enfriamiento, el gradiente térmico y el tamaño de la alberca de fusión (ancho y profundidad) del material. Se definieron las dimensiones del hexaedro: ancho, largo y alto, con valores válidos entre 1 y 10 mm. Posteriormente, se generó la microestructura en un cubo más pequeño inscrito dentro del hexaedro. El cubo representa un conjunto de tres planos 2D con ancho y alto iguales a las dimensiones del sensor. Se utilizó un cubo con dimensiones de 10 mm con separación del borde de 0.25 mm desde los bordes de la superficie superior del hexaedro para garantizar que la microestructura de la alberca de fusión térmica haya alcanzado estado estable. La tasa de enfriamiento, gradiente térmico, ancho y profundidad de la alberca de fusión son utilizadas por el solucionador de microestructura como valores promediados.

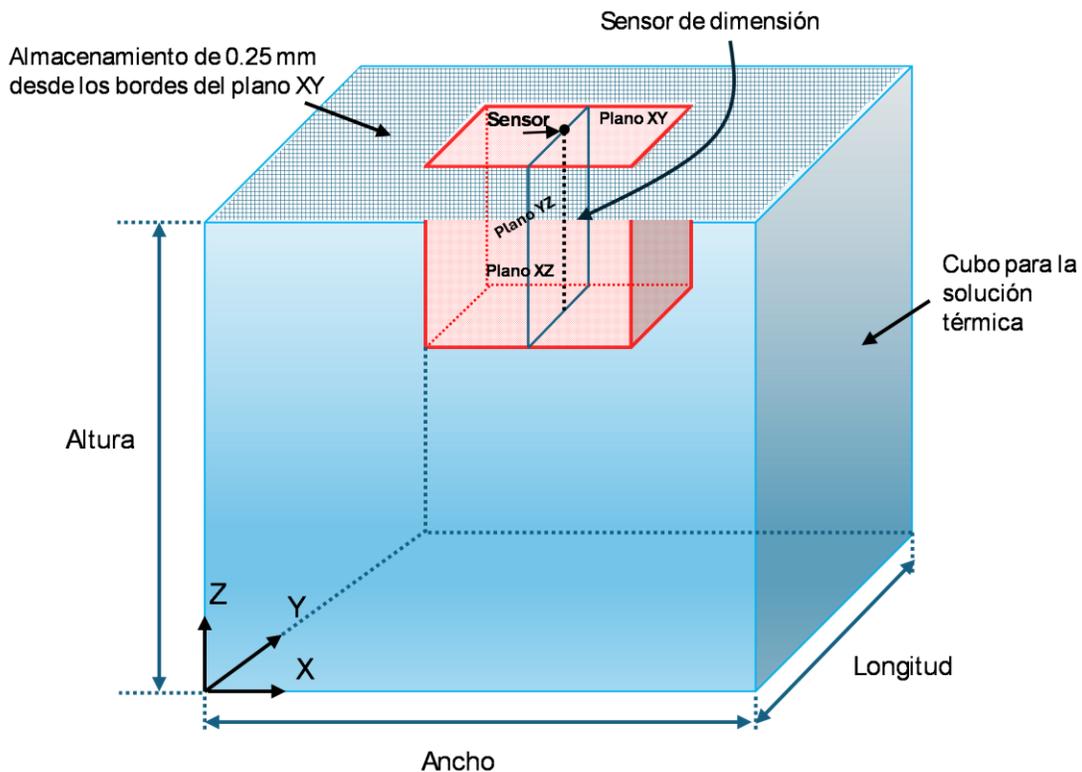


Fig. 4. Configuración geométrica para la simulación de microestructura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del modelo numérico permiten predecir la evolución de la alberca de fusión del AlSi10Mg durante el proceso SLM. Para validar los resultados obtenidos en las simulaciones, se usaron imágenes de la alberca de fusión tomadas a resoluciones de 200  $\mu\text{m}$ , de las cuales se midieron el ancho y profundidad de la alberca, ver figura 5.

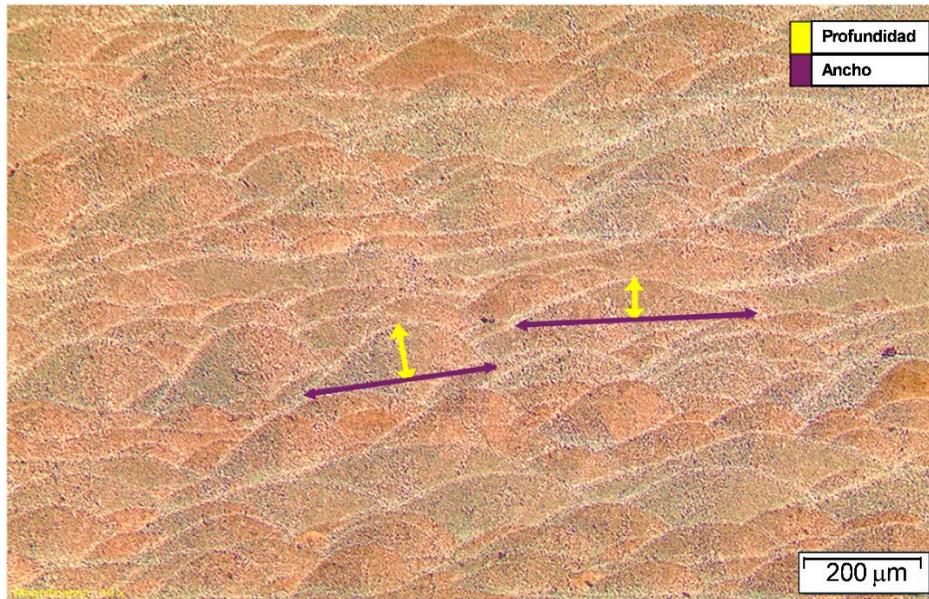


Fig. 5. Micrografía de las albercas de fusión después del proceso SLM.

La simulación se realizó en un cubo de 10 mm, donde se graficaron las dimensiones de la alberca de fusión a lo largo de este recorrido, ver figura 6.

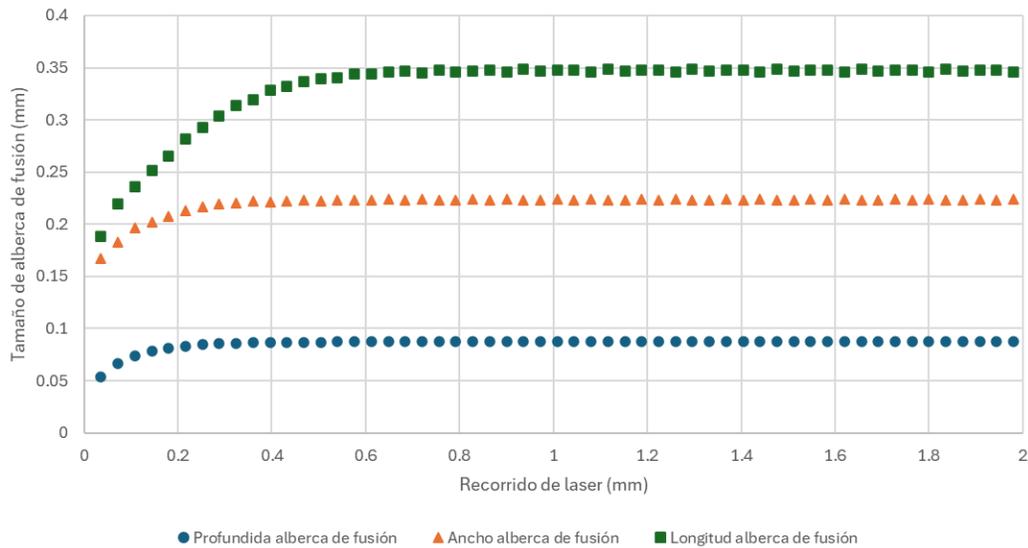


Fig. 6. Resultados numéricos de las dimensiones de la alberca de fusión.

El análisis de la evolución de la alberca de fusión en el escaneo de una sola trayectoria mostró que la alberca comienza a formarse después de que el haz del láser recorre una distancia corta. Las dimensiones de la alberca aumentan hasta alcanzar un estado estable. Se observó que la profundidad y el ancho alcanzan equilibrio antes que la longitud, ésta se desarrolla completamente alrededor de los 0.6 mm con los parámetros seleccionados. Esta información permitió identificar el punto en el que la alberca de fusión alcanza un estado estable y proporcionó una base para interpretar los efectos de las diferentes condiciones del proceso.

Los resultados experimentales fueron consistentes con las predicciones del modelo, lo que confirma que los parámetros de fabricación empleados son adecuados para alcanzar las

características deseadas en las piezas, especialmente en cuanto al tamaño de la alberca de fusión y la reducción de la porosidad. La tabla I presenta una comparativa de los resultados numéricos y experimentales utilizados durante el proceso SLM.

Tabla I Resultados numéricos y experimentales de mediciones de albercas de fusión.

Orientación	Tamaño de alberca de fusión ( $\mu\text{m}$ )	
	Experimental	Simulación
Ancho	243	250
Profundidad	71	90

La simulación de microestructura permitió evaluar la distribución de tamaño de grano y ángulo de orientación de los granos para los planos  $XY$ ,  $YZ$ , y  $XZ$ , ver figura 7.

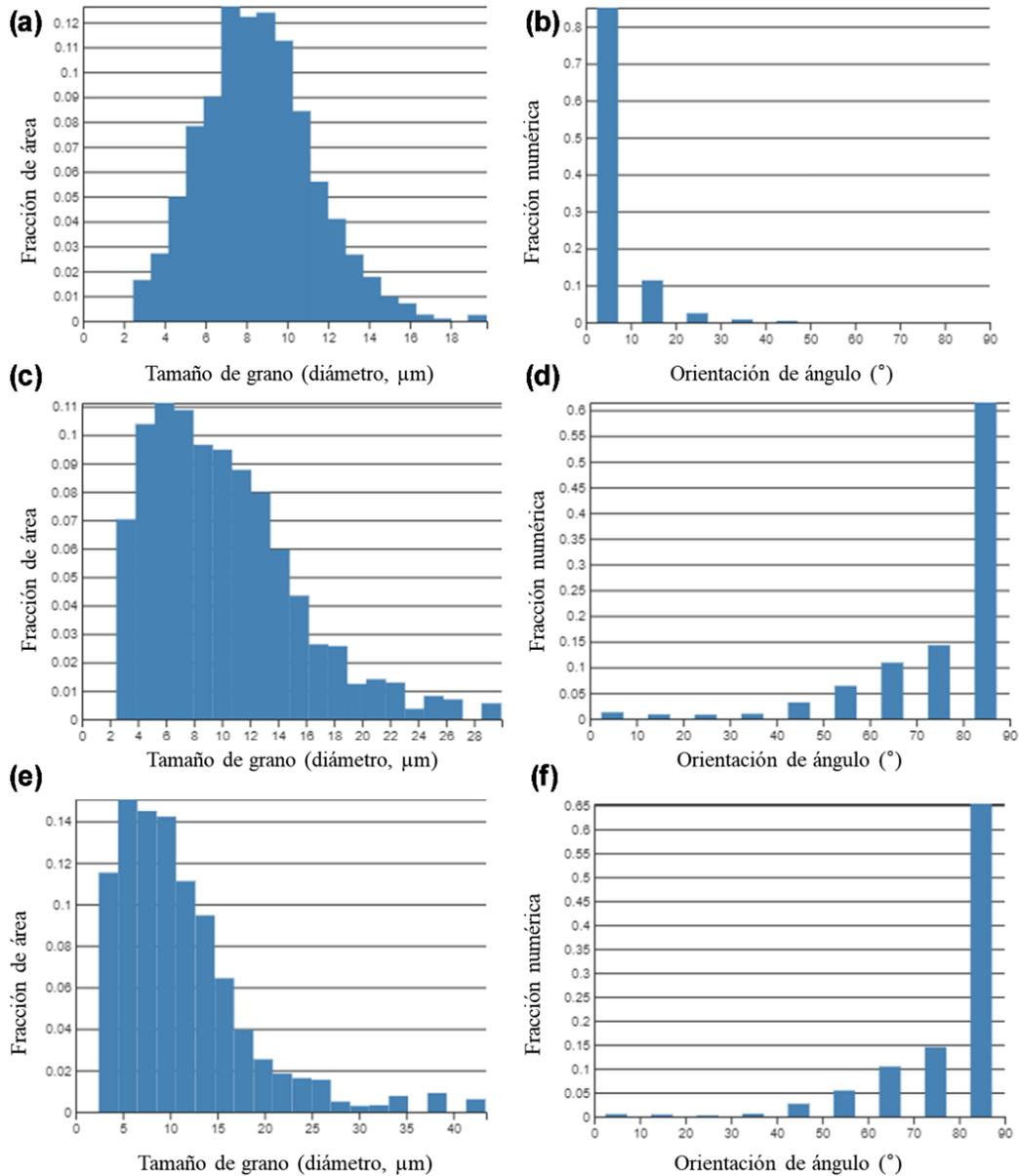


Fig. 7 Simulación de microestructura del AlSi10Mg durante el proceso SLM, (a) tamaño de grano en plano  $XY$  y (b) ángulo en plano  $XY$ , (c) tamaño de grano en plano  $YZ$  y (d) ángulo en plano  $YZ$ , (e) tamaño de grano en plano  $XZ$  y (f) ángulo en plano  $XZ$ .

En la sección (a) se generó una distribución de tamaños de los granos, facilitando la visualización a lo largo del plano XY, este resultado proporciona una comprensión clara del comportamiento de los granos bajo las condiciones procesamiento evaluadas. El tamaño de grano en el plano XY (vista superior) obtuvo un valor promedio de 8.576  $\mu\text{m}$ . En la sección (b) el ángulo de orientación se refiere a la dirección de crecimiento de los granos con respecto al eje horizontal del plano XY, éste es influenciado por la fuente de calor en movimiento. Es importante resaltar que las orientaciones de los granos simulados no representan las orientaciones cristalinas que se observan en mapas de difracción de electrones por retrodispersión. Sin embargo, los resultados de la simulación son adecuados para comparar la morfología de los granos, su tamaño y la dirección de crecimiento.

En la sección (d) se observa la distribución de tamaño de grano en el plano YZ, donde el tamaño de grano obtuvo un valor promedio de 9.875  $\mu\text{m}$ . La sección (e) muestra el ángulo de orientación para este mismo plano. La sección (f) registra un tamaño de grano promedio de 10.947  $\mu\text{m}$  y su respectivo ángulo de orientación se presenta en la sección (f).

Los resultados numéricos permitieron evaluar zonas con falta de fusión, ver figura 8. Este problema se identifica en las regiones donde la orientación es igual a 0, lo que indica material no fundido. En los mapas de orientación y número de granos, estas zonas aparecen como vacíos en regiones donde debería haber continuidad granular, confirmando la presencia de porosidad.

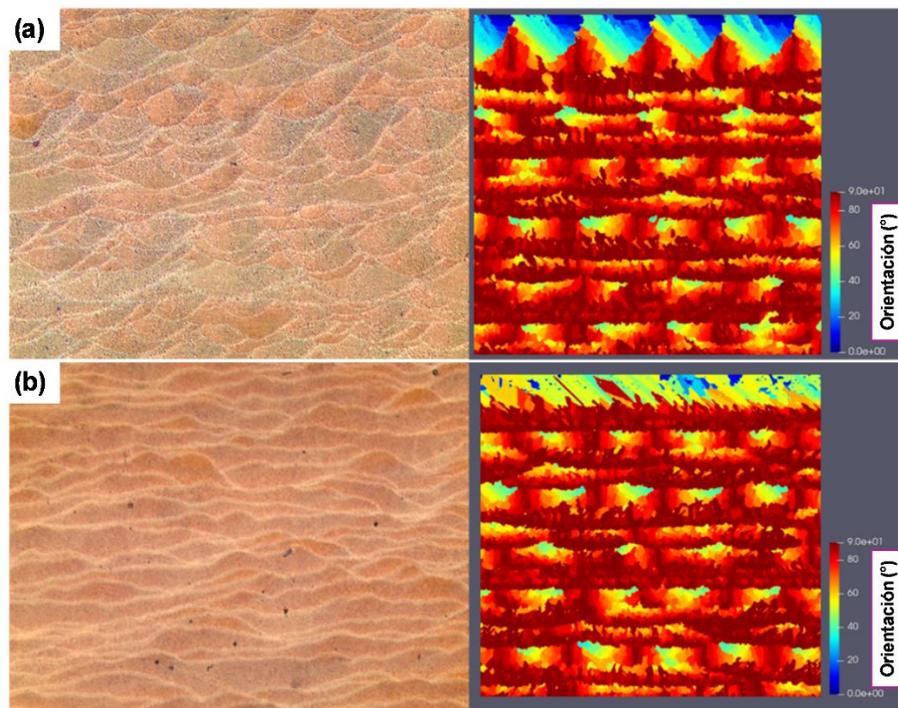


Fig. 8. Comparativa experimental y numérica de las albercas de fusión, (a) vista frontal de la muestra y (b) vista lateral de la muestra.

Para los planos YZ y XZ se comprobó que, bajo parámetros óptimos, no se observan poros entre las albercas de fusión, indicando que el material se fundió correctamente. Estos resultados destacan la importancia de calibrar adecuadamente los parámetros del proceso, ya que una fusión incompleta afecta negativamente tanto las propiedades mecánicas como la calidad final de las piezas. Ajustes precisos en la profundidad, el ancho y la longitud de las albercas de fusión son esenciales para garantizar las propiedades mecánicas y la calidad final de las piezas fabricadas.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo numérico del AlSi10Mg mediante el método SLM, evaluando aspectos clave como las dimensiones de la alberca de fusión, la densidad relativa y la microestructura de las piezas fabricadas. El modelo numérico permitió observar la estabilización de las dimensiones de la alberca de fusión después de 0.75 mm de recorrido del láser. Esta estabilización es crucial para asegurar la uniformidad del proceso y minimizar defectos de fabricación, validando así la efectividad de las condiciones seleccionadas.

Las simulaciones de microestructura proporcionaron información detallada sobre el tamaño y la orientación de los granos, factores que afectan directamente las propiedades finales del material. Los gráficos de distribución de tamaños de grano mostraron una relación directa entre las condiciones de fabricación y la uniformidad de la microestructura, aportando datos valiosos para la optimización del proceso. Las simulaciones de porosidad demostraron que bajo condiciones óptimas, se genera una suficiente profundidad en la alberca de fusión permitiendo generar piezas consolidadas evidenciando el control efectivo del proceso bajo condiciones controladas.

## REFERENCIAS

1. Pérez, L. M. B., Sepúlveda, J. a. T., & Lozano, A. J. B. (2022). *Manufactura y gestión del ciclo de vida del producto (PLM)*. Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM.
2. Xu, S., Zhai, W., Huang, R., Fu, J., Fu, M., & Feng, L. (2022). *Metal-Based 3D-Printed Micro Parts & Structures*. In Elsevier eBooks (pp. 448–461). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819726-4.00009-0>.
3. Munir, K., Biesiekierski, A., Wen, C., & Li, Y. (2020). *Selective laser melting in biomedical manufacturing*. In Elsevier eBooks (pp. 235–269). <https://doi.org/10.1016/b978-08-102965-7.00007-2>.
4. Ashwath, P., Xavior, M. A., Batako, A., Jeyapandiarajan, P., & Joel, J. (2022). Selective laser melting of Al–Si–10Mg alloy: microstructural studies and mechanical properties assessment. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2249–2258. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.135>.
5. Taborda J., Zambrano P., (2023). *Process Parameters Effect and Porosity Reduction on AlSi10Mg Parts Manufactured by Selective Laser Melting*. Research Square (Research Square). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2876713/v1>.
6. Lu, Q., Ou, Y., Zhang, P., & Yan, H. (2022). Fatigue performance and material characteristics of SiC/AlSi10Mg composites by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 858, 144163. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144163>.
7. Bo, C., & Chou, K. (2015). Melt pool evolution study in selective laser melting. Conference: 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference At: Austin, TX, USA.
8. Teng, C., Gong, H., Szabo, A., Dilip, J. J. S., Ashby, K., Zhang, S., Patil, N., Pal, D., & Stucker, B. (2016). Simulating Melt Pool Shape and Lack of Fusion Porosity for Selective Laser Melting of Cobalt Chromium Components. *Journal Of Manufacturing Science and Engineering*, 139(1). <https://doi.org/10.1115/1.4034137>.
9. Arvieu, C., Galy, C., Guen, E. L., & Lacoste, E. (2020). Relative Density of SLM-Produced Aluminum Alloy Parts: Interpretation of Results. *Journal Of Manufacturing And Materials Processing*, 4(3), 83. <https://doi.org/10.3390/jmmp4030083>.
10. Nothomb, N., Rodriguez-Barber, I., Pérez-Prado, M. T., Mena, N. J., Pyka, G., & Simar, A. (2024). Understanding the effect of pre-sintering scanning strategy on the relative density of Zr-modified Al7075 processed by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing Letters*, 100253. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2024.100253>.
11. Akram, J., Chalavadi, P., Pal, D., & Stucker, B. (2018). Understanding grain evolution in additive manufacturing through modeling. *Additive Manufacturing*, 21, 255-268. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.021>.