

Modelado de partículas esféricas para aplicaciones en manufactura aditiva de metales

Spherical particle modelling for metal additive manufacturing processes

M. Gamboa Aispuro^{1,2}, Malena Ley Bun Leal^{1,2}, Bárbara Bermúdez Reyes^{1,2}, L. A. Reyes Osorio^{1,2},
Patricia del C. Zambrano Robledo^{1,2}, Omar E. López Botello^{2,3,*}

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica
Ave. Pedro de Alba S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 66455, México

²Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADiT), México

³Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Monterrey, Nuevo León, 64849, México.

*omarlopez@tec.mx

Resumen

La Manufactura Aditiva (MA) de metales es un proceso muy complejo que involucra distintos factores y parámetros que afectan el resultado de la pieza final y el tiempo empleado para la obtención de piezas. Para reducir los costos y tiempos de fabricación en los procesos de MA con la técnica de Fusión Selectiva Laser (SLM, por sus siglas en inglés), es importante crear modelos numéricos más aproximados a la realidad para obtener resultados que se verán reflejados en la calidad de la pieza obtenida. Es por esto que, el modelado de partículas esféricas es importante para la simulación de procesos SLM debido a que de esta manera es posible representar una distribución de polvos metálicos. Por lo tanto, se desarrolló un algoritmo capaz de producir camas de polvos mediante la generación de partículas esféricas de distintos tamaños con una distribución Gaussiana y en posiciones aleatorias. El algoritmo genera las coordenadas de cada partícula y su respectivo radio, los cuales pueden implementarse en diferentes softwares para simulación de la técnica de SLM. Lo anterior se corroboró al generar diversas camas de polvos obteniendo satisfactoriamente esferas de distintos tamaños y con distribución Gaussiana.

Abstract

Additive Manufacturing (AM) of metals is a very complex process that involves different factors and parameters that affect the result of the final piece, as well as the time used to obtain parts. To reduce costs and manufacturing times in the AM processes with the Selective Laser Melting (SLM) technique, it is important to create numerical models that are closer to reality in order to obtain results that will be reflected in the quality of the obtained piece. That is why, the modeling of spherical particles is important for the simulation of SLM processes because in this way it is possible to represent a distribution of metallic powders. Therefore, an algorithm capable of producing powder beds was developed by generating spherical particles of different sizes with a Gaussian distribution and random positions. The algorithm generates the coordinates of each particle, as well as its respective radius, which can be implemented in different softwares for simulation of the SLM technique. This was corroborated by generating different powder beds satisfactorily obtaining spheres of diverse sizes and Gaussian distribution.

Palabras clave:

Manufactura Aditiva, SLM, Simulación, Camas de Polvos, Partículas

Keywords:

Additive Manufacturing, SLM, Simulation, Powder Bed, Particles

Introduction

Se define a la Manufactura Aditiva (MA) como la unión de materiales capa por capa para fabricar objetos mediante un modelo 3D. La MA ha captado el interés en los sectores industriales y de investigación debido a su versatilidad y precisión en la elaboración de piezas funcionales de distintos materiales [1].

Los sistemas de cama de polvos consisten en depositar partículas metálicas sobre una base móvil de material compatible con el de los polvos. Un dispensador de polvo (comúnmente conocido como “wiper”) recorre la base para adecuar la cama de polvos al espesor deseado y posteriormente un láser barre las partículas de polvo en las posiciones ordenadas por

el modelo 3D para fusionarlas. Una vez que ese ciclo termina, la base desciende según el espesor de capa especificado y una nueva cama de polvos es depositada para repetir el proceso capa por capa hasta obtener la pieza final. Todo este proceso se lleva a cabo dentro de una cámara sellada al vacío y con una atmosfera de gas inerte para evitar la oxidación de las partículas de polvo y posibles riesgos de explosión [2]. Una imagen descriptiva del proceso SLM puede apreciarse en la Figura 1.

La calidad de las piezas producidas mediante SLM está relacionada directamente con los parámetros que influyen en el proceso, tales como la potencia del láser, diámetro del láser, enfoque del láser, velocidad de barrido (en sistemas de lá-

ser continuo), distancia entre puntos y tiempo de exposición (en sistemas de láser modulado), distancia entre líneas de barrido (Hatch Spacing en inglés), espesor de capa, etc. Por lo anterior, la MA de metales con el proceso SLM se encuentra en constante estudio para determinar los parámetros de manufactura óptimos en distintos materiales, para obtener piezas de alta calidad y densidad similares a los procesos de manufactura tradicionales [4].

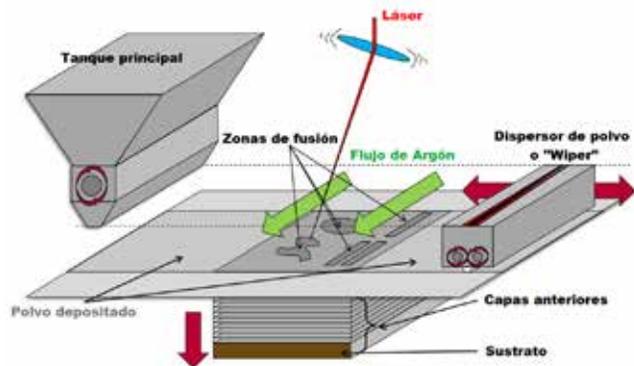


Figura 1.- Descripción gráfica del proceso SLM. Traducido al español de V. Algara Muñoz [3].

Para el estudio de lo antes mencionado se manufacturaron muestras con distintos parámetros para determinar su densidad relativa (mediante el principio de Arquímedes y/o procesamiento de imágenes). Lo anterior indica que se deben obtener numerosas piezas y análisis, y para evitar esto último, se recurre al desarrollo de modelos numéricos donde se simule el proceso SLM variando los parámetros hasta conseguir los resultados esperados [5].

Existen diversas investigaciones donde se muestra el desarrollo de estas simulaciones en distintos softwares comerciales, donde los modelos de las camas de polvos normalmente son tomados como un medio continuo pero definiendo las propiedades de las partículas de polvo, siendo estas diferentes a las propiedades del sólido. Estos modelos numéricos han ofrecido resultados favorables en la predicción de microestructura, esfuerzos residuales, e historial térmico [6–11].

Algunos trabajos muestran investigaciones donde se trabaja con simulaciones que modelan las partículas de polvo y estas son fundidas por una fuente de calor. Otros trabajos implementan camas de polvos con el mismo tamaño de partículas, y otros más realizan un modelo con partículas de distintos tamaños, lo cual se asemeja a un proceso real donde las partículas se distribuyen de distintas maneras dependiendo de la geometría, material y distintos factores de dispersión de polvos de las máquinas SLM, resultando en densidades variables de camas de polvos [12–15].

Usualmente se recurre a algoritmos que generan esferas con posiciones aleatorias para la creación de partículas. Jodrey y Tory [16] presentan un algoritmo capaz de generar partículas

en posiciones aleatorias y de distintos tamaños en 2D. Zhou et al. [17] generaron paquetes de partículas esféricas 3D con dimensiones y posiciones aleatorias, tomando en cuenta los efectos de la gravedad y el efecto de agitación, sentando las bases para este tipo de estudios. Richter [18] creó un algoritmo para la creación de partículas de posiciones y tamaños aleatorios dentro de un cubo, pero las partículas no se logran distribuir uniformemente, por lo cual obtuvo alta porosidad en las piezas.

Por lo anterior, este trabajo trata del desarrollo de un algoritmo capaz de generar partículas esféricas con posiciones aleatorias y con una distribución de tamaños Gaussiana para SLM.

Metodología

El algoritmo se desarrolló utilizando el software Matlab de manera que se especifiquen el diámetro mínimo y diámetro máximo de las partículas. Este valor es proporcionado en micrómetros (μm) al igual que los valores referentes al largo, ancho y espesor de la capa de polvos o contenedor de partículas. También se especificó el número de intentos para colocar las partículas (o número de coordenadas a crear) para que el algoritmo intente colocar cada una de las partículas aleatorias.

Por lo tanto, el algoritmo debe de cumplir con los siguientes criterios:

- Crear un sistema coordenado tridimensional con las dimensiones especificadas de la cama para generar de manera aleatoria un determinado número de posiciones.
- El centro de cada esfera debe estar dentro del sistema coordenado que simula ser la capa de polvos y no debe de posicionarse dentro de otra esfera que haya sido generada.
- Los diámetros de las esferas deben variar de acuerdo a una distribución normal o Gaussiana.
- El algoritmo requiere posicionar cada partícula una sola vez.
- Al generarse una esfera en determinada posición, si esta se sobrepone con otra ya colocada anteriormente, esta última es eliminada y se crea una nueva con radio y coordenadas distintas.
- Una vez que se llega al número máximo de intentos, el algoritmo finaliza con el procesamiento, y se obtienen las coordenadas y radios de partículas que se posicionaron dentro del sistema coordenado, generando una gráfica de distribuciones de partículas en la cama de polvos.

Desarrollo de partículas

Para producir una distribución de tamaños Gaussiana se utilizó Matlab. Primero se crean las esferas más grandes para dar prioridad de posicionarlas, posteriormente se van gene-

rando las partículas de menor tamaño para posicionarlas en los huecos existentes entre las partículas de mayor tamaño. De esta manera se tendrá una mejor densidad aparente en la cama.

Las partículas deben estar posicionadas de manera que exista una mínima distancia entre cada una de ellas simulando un proceso de deposición de polvo en una máquina SLM. Tomando esto en cuenta, el cálculo de una nueva esfera se hace de acuerdo a lo establecido en la ecuación (1).

$$r_{tent} = \frac{Z_{min}}{1 + k_{del} + s^i} \quad (1)$$

Donde r_{tent} es el radio tentativo de la nueva esfera, Z_{min} la distancia mínima entre las coordenadas de la nueva esfera y las esferas creadas anteriormente (ecuación 2), k_{del} un coeficiente de separación entre esferas, s la constante de reducción de separaciones ($s=1+10^{Sr}$), Sr coeficiente de reducción de la separación, e i el número de pasos requeridos para disminuir gradualmente r_{tent} .

$$Z_{min} = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2 + (z_a - z_c)^2} \quad (2)$$

Donde x_a, y_a, z_a son las nuevas coordenadas generadas en los distintos ejes, y x_c, y_c, z_c las coordenadas de las esferas creadas anteriormente.

Por último, para que la esfera pueda ser creada debe cumplir con las condiciones establecidas en las ecuaciones (3, 4, 5).

$$r_{tent} > \frac{R_{max}}{(k_{red})^i \cdot \left(1 + \frac{k_{del}}{s^i}\right)} \quad (3)$$

$$R_{max} > r_{tent} \quad (4)$$

$$r_{tent} \leq Z \quad (5)$$

Donde R_{max} es el radio máximo a crear para una esfera, k_{red} una constante para la reducción del radio tentativo ($1+10^K$), K una constante de reducción, y Z la coordenada en el eje Z de la esfera creada.

Para este trabajo se realizaron pruebas con un tamaño de cama de $500 \times 300 \times 70 \mu\text{m}$ y de 10000 a 150000 intentos, es decir, que al establecer 10000 intentos el algoritmo creará ese número de coordenadas y radios e intentará posicionar cada uno de ellos. El número de intentos especificados fue seleccionado de acuerdo a los resultados de parámetros experimentales presentados en la literatura [19,20].

Las pruebas fueron desarrolladas en una Workstation equipada con procesador Intel Xeon dual core, 12 GB de memoria RAM y un sistema operativo de 64 bits.

Calculo de densidad aparente

En cada una de las pruebas realizadas se calculó el volumen de la cama como un medio sólido y el volumen total ocupado por las partículas generadas. Con estos dos valores es posible obtener la relación de densidad de cada cama y así comparar los resultados con lo establecido en la literatura. La relación de densidad es calculada de acuerdo a la ecuación (6).

$$\rho_r = \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (6)$$

Donde ρ_r es la relación de densidad, ρ_p la densidad de la cama de polvos, y ρ_s la densidad de la cama sólida.

La ecuación (6) muestra la relación entre la densidad de las partículas y la densidad de la cama como sólido. Sin embargo, esa relación puede ser determinada solamente con los volúmenes debido a lo demostrado con las ecuaciones (7, 8, 9, 10).

$$\rho_{mat} = \frac{m}{v} \quad (7)$$

Donde ρ_{mat} es la densidad del material en estudio, m la masa y v el volumen. Mediante esta ecuación se puede determinar la masa como se muestra en la ecuación (8).

$$\begin{cases} m_p = \rho_{mat} \cdot v_p \\ m_s = \rho_{mat} \cdot v_s \end{cases} \quad (8)$$

Donde m_p y m_s son la masa de las partículas creadas y la masa del contenedor sólido respectivamente, v_p y v_s son el volumen ocupado por las esferas y el volumen del contenedor sólido respectivamente. Con la masa es posible determinar la densidad de la cama de polvos y la densidad de la caja.

$$\rho_p = \frac{\rho_{mat} \cdot v_p}{v_s} \quad (9)$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{mat} \cdot v_s}{v_s}$$

Sustituyendo lo descrito por la ecuación (9) en la ecuación (6), se obtiene lo siguiente:

$$\rho_r = \frac{\frac{\rho_{mat} \cdot v_p}{v_s}}{\frac{\rho_{mat} \cdot v_s}{v_s}} = \frac{v_p}{v_s} \quad (10)$$

Finalmente, con lo mostrado en la ecuación (10) se comprueba cómo es que una relación de volumen es representativa a la relación de densidad.

Resultados

Se realizaron cinco pruebas por cada número de intentos propuestos ya que de acuerdo a datos vistos en la literatura, el número de pruebas admisible para determinar el error de una prueba se encuentra en el rango de tres a diez mediciones [21–25]. En la Tabla 1 se muestran los resultados promedio de las pruebas efectuadas.

Tabla 1.- Resultados promedio de las pruebas realizadas para cada número de intentos.

Num. de intentos ($\times 10^3$)	Tiempo de procesamiento (minutos)	Volumen de partículas ($\text{cm}^3 \times 10^{-6}$)	Relación de densidad	Desviación estándar
10	0.36	1.41	0.1388	0.0142
50	5.14	3.81	0.3663	0.0114
75	11.51	5.58	0.5263	0.0131
100	19.72	6.06	0.5693	0.0186
125	30.84	5.33	0.5012	0.0110
150	42.90	5.08	0.4841	0.0220

En la Tabla 1 se logran apreciar valores bajos de desviación estándar lo que indica poca dispersión de los datos. Adicionalmente se calculó el coeficiente de varianza por mínimos cuadrados obteniendo un resultado de 0.0511, valor muy pequeño que resulta en una alta reproducibilidad [26].

El volumen de las partículas fue calculado de acuerdo a los radios generados y almacenados por el algoritmo. Para ello se calculó el volumen de cada esfera y se realizó una sumatoria de estos datos para obtener el volumen total ocupado por las partículas.

En la Figura 2 se muestra la distribución obtenida con 10000 intentos. Se observan pocas partículas y un espaciado considerablemente grande entre ellas, esto debido a que el número de intentos es pequeño y por lo tanto, no es posible posicionar la gran mayoría de las esferas generadas, lo que significa mayor porosidad en las camas de polvos. Este com-

portamiento se asemeja a una mala calibración del wiper de una máquina SLM al configurar una distancia vertical muy corta entre el wiper y la base.

La Figura 3 muestra los resultados al programar 50000 intentos, siendo notable un aumento en el número de partículas y el espacio entre ellas, y por lo tanto, un incremento en la densidad aparente de la cama de polvos.

En las Figuras 4 y 5 se pueden apreciar las distribuciones de partículas con 75000 y 100000 intentos respectivamente. Es muy notoria la mejora en el espacio entre partículas y los tamaños, resultando en densidades de 52% para 75000 intentos y 56 % para 100000 intentos, valores de densidad muy similares a una cama de polvos para SLM [27].

Las Figuras 6 y 7 exponen los resultados de 125000 y 150000 intentos respectivamente. Ambos muestran una distribución irregular con partículas muy grandes y muy pequeñas, incumpliendo con la distribución buscada y resultando finalmente en bajas densidades de las camas de polvos. Por otro lado, esta distribución puede ser utilizada para el modelado de algunos polvos debido a que la distribución depende en gran medida al procesamiento utilizado por los fabricantes.

El comportamiento de la distribución presentada por estas pruebas puede observarse en la Figura 8, en la cual se observa una tendencia a disminuir la densidad de la cama de polvos al alcanzar un número mayor a los 100000 intentos. Esto es debido principalmente a la relación mostrada en la ecuación (1), donde el factor y coeficiente de separación aumentan de acuerdo al número de intentos.

Se pueden apreciar mejores resultados entre 75000 a 100000 intentos debido a que se obtiene una relación de densidad de 0.52 a 0.57, lo que representa un valor similar a datos experimentales medidos de acuerdo a los estudios de Karapatis y Egger [27], donde determinaron de manera experimental la densidad aparente de polvos metálicos para MA.

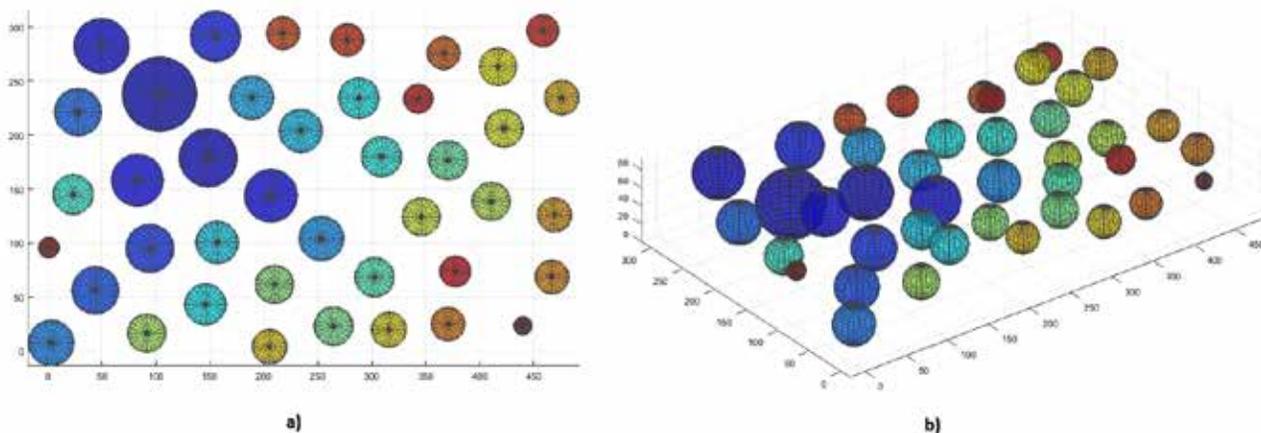


Figura 2.- Resultados para 10000 intentos en a) vista 2D y b) vista 3D.

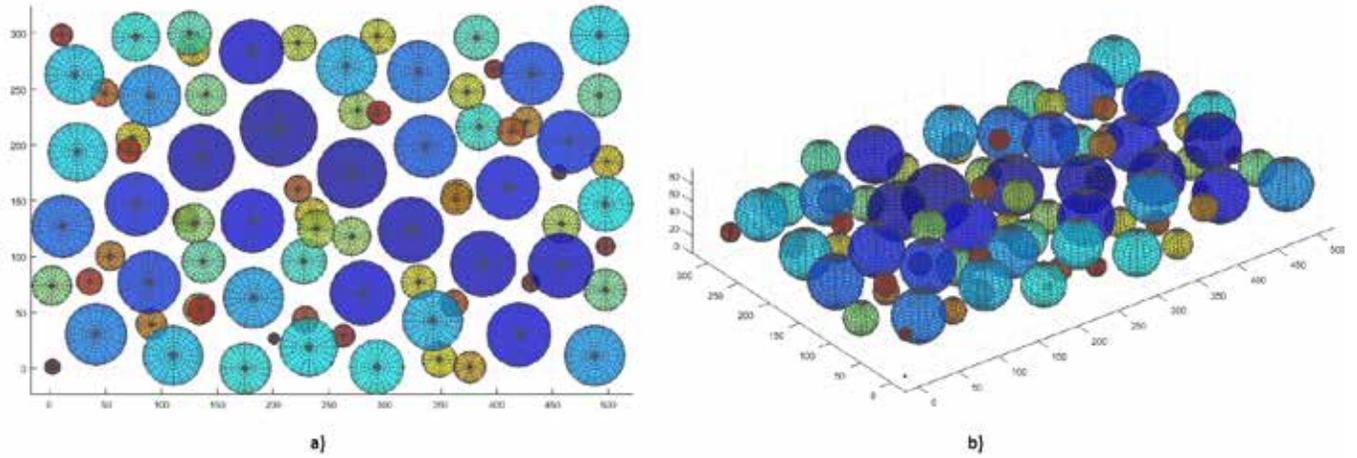


Figura 3.- Resultados para 50000 intentos en a) vista 2D y b) vista 3D.

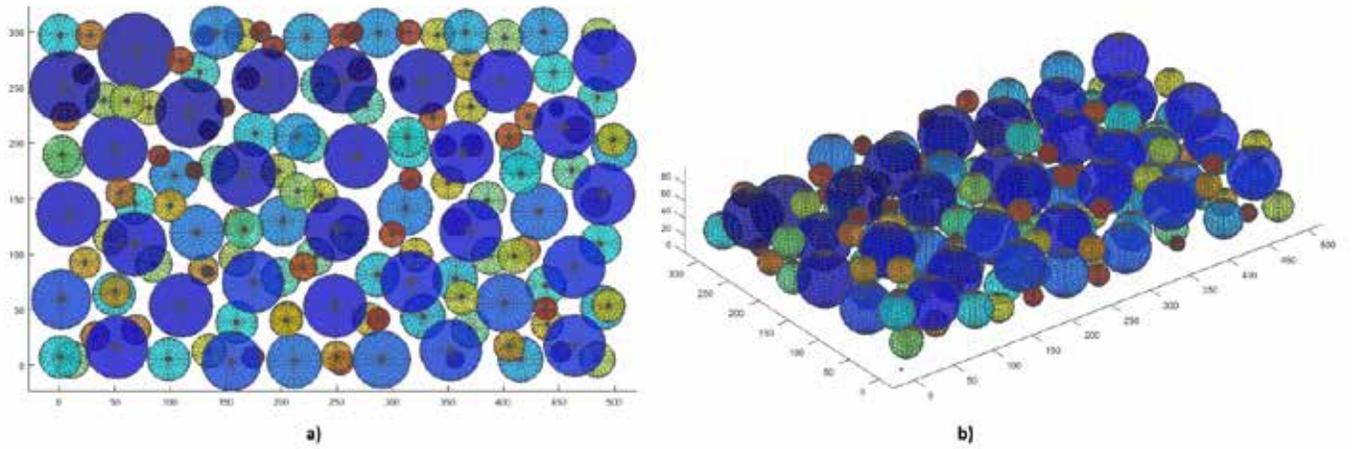


Figura 4.- Resultados para 75000 intentos en a) vista 2D y b) vista 3D.

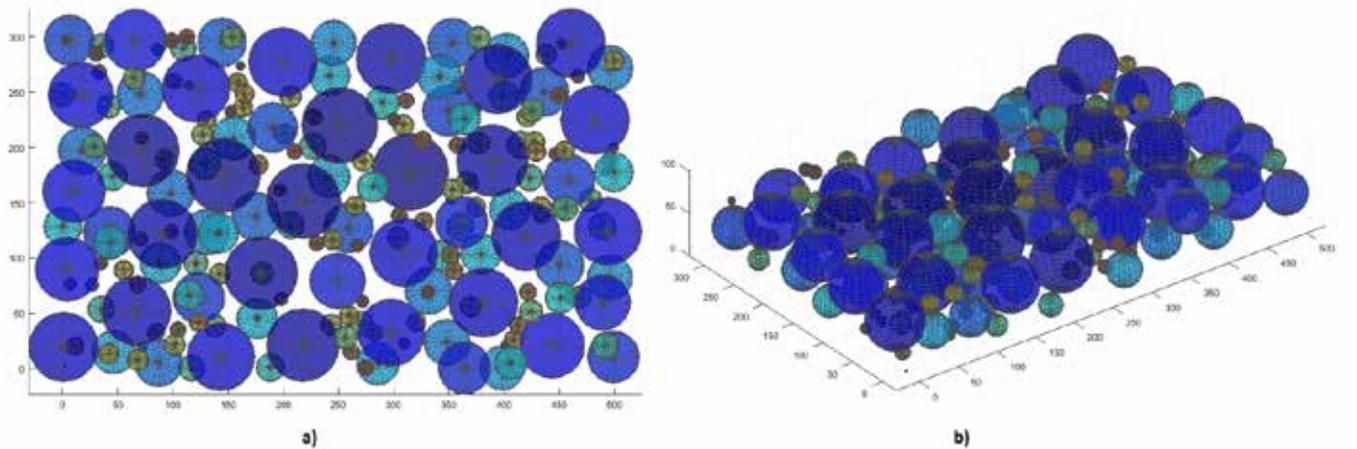


Figura 5.- Resultados para 100000 intentos en a) vista 2D y b) vista 3D.

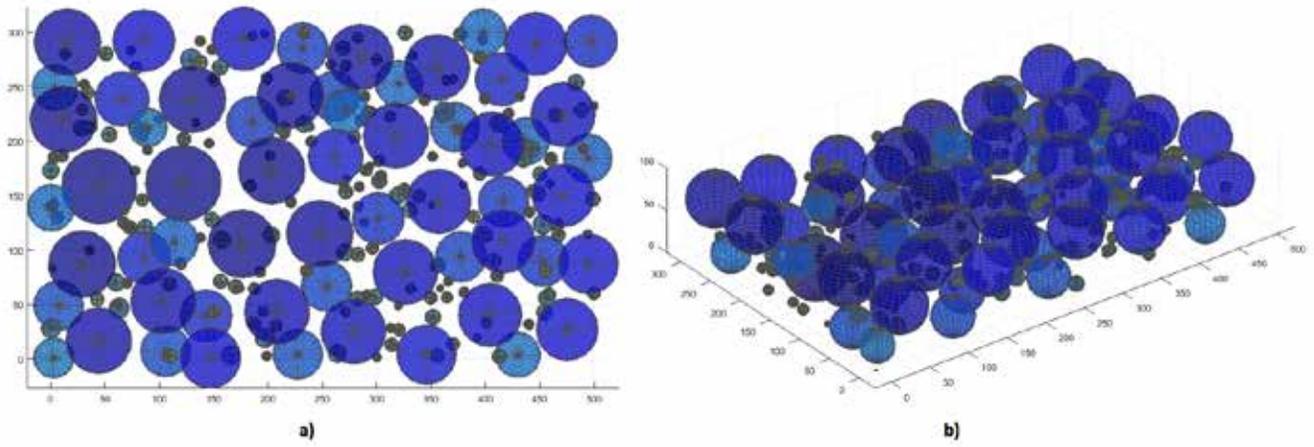


Figura 6.- Resultados para 125000 intentos en a) vista 2D y b) vista 3D.

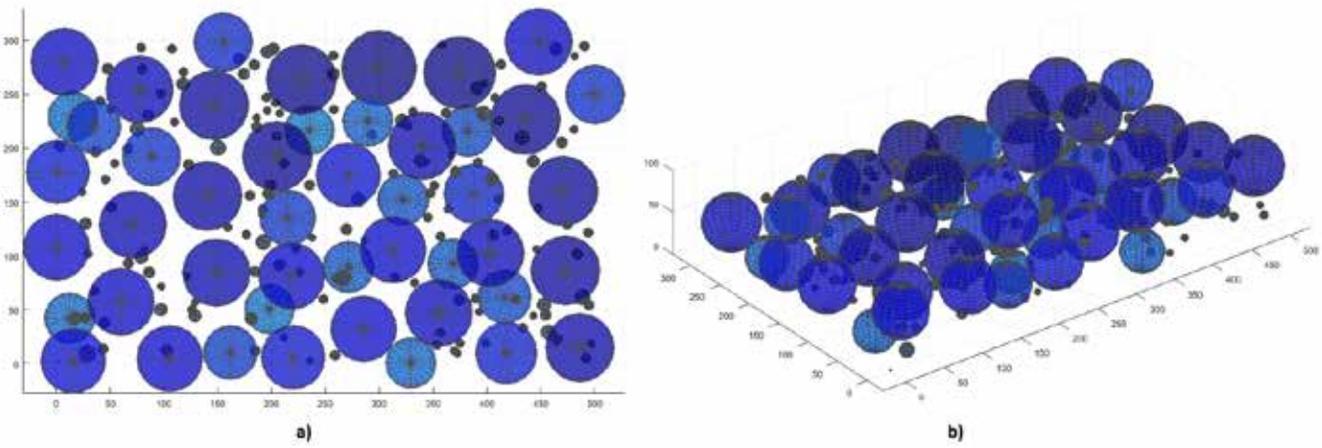


Figura 7.- Resultados para 150000 intentos en a) vista 2D y b) vista 3D.

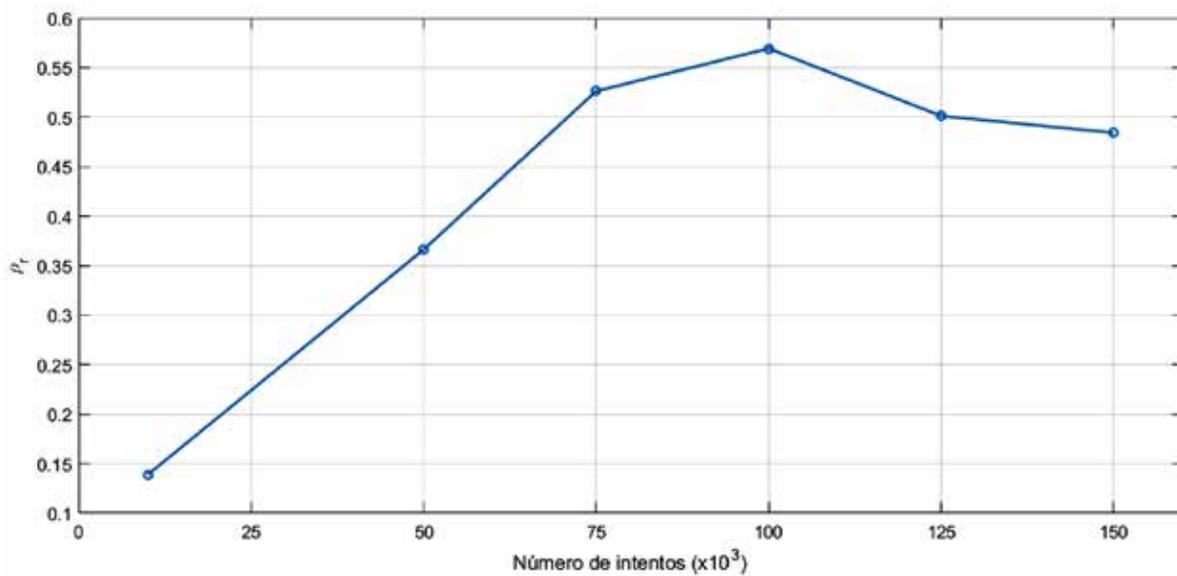


Figura 8.- Comportamiento de la relación de densidad de acuerdo a la Tabla 1.

Sobolev y Amirjanov [28] generaron paquetes de partículas con tamaños de partículas distintos implementando una distribución exponencial, por lo que la distribución de tamaños de partículas no se asemeja lo suficiente a una de SLM. En este algoritmo se generaron los tamaños de esferas con una distribución normal para simular con mayor precisión una cama de polvos metálica utilizada para SLM.

Conclusiones

Se logró desarrollar un algoritmo capaz de generar partículas esféricas para camas de polvos implementadas a simulaciones del proceso SLM. Las camas realizadas presentaron distintos valores de relación de densidad de acuerdo al número de intentos, resultando la cama de 75000 intentos con una mejor distribución acorde a lo visto para SLM. La cama de 100000 intentos muestra mayor relación de densidad, sin embargo su distribución de tamaños tiende a hacer un mayor número de esferas pequeñas y grandes, tal y como el comportamiento de las camas de 125000 y 150000 intentos.

Esto dirige a que el número de intentos alcanza un límite máximo y después de este tiende a hacer una distribución desigual de tamaños de partículas. La razón de estas distribuciones es que el tamaño de partículas está ligado al coeficiente de reducción de tamaño de esferas, afectando al radio tentativo y finalmente a las condiciones del algoritmo para determinar que esferas conservar y cuales eliminar. Esto puede ser optimizado mediante correcciones experimentales de dicho coeficiente.

El algoritmo fue optimizado para su uso en modelos numéricos de SLM utilizando camas de polvos con densidades aparentes cercanas al 55%, pero puede ser utilizado para otros valores de densidad y distribución de tamaños acordes al material implementado, así como propósitos diversos en estudio de partículas.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo de investigación agradecen por los fondos provistos por el Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECyT) por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), para el proyecto titulado: Fortalecimiento aeronáutico del noreste de México.

Referencias

- [1] W.E. Frazier, *Metal Additive Manufacturing: A Review*, J. Mater. Eng. Perform. 23 (2014) 1917–1928. doi:10.1007/s11665-014-0958-z.
- [2] T.G. Spears, S.A. Gold, *In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing*, Integrating Mater. Manuf. Innov. 5 (2016) 2. doi:10.1186/s40192-016-0045-4.

- [3] V. Algara Muñoz, *Analysis of the optimal parameters for 3D printing aluminum parts with a SLM 280 machine*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [4] C. Galy, E. Le Guen, E. Lacoste, C. Arvieu, *Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences*, Addit. Manuf. 22 (2018) 165–175. doi:10.1016/j.addma.2018.05.005.
- [5] N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, *Reducing porosity in AISi10Mg parts processed by selective laser melting*, Addit. Manuf. 1–4 (2014) 77–86. doi:10.1016/j.addma.2014.08.001.
- [6] O. Lopez-Botello, U. Martinez-Hernandez, J. Ramírez, C. Pinna, K. Mumtaz, *Two-dimensional simulation of grain structure growth within selective laser melted AA-2024*, Mater. Des. 113 (2017) 369–376. doi:10.1016/j.matdes.2016.10.031.
- [7] C. Li, Y. Guo, X. Fang, F. Fang, *A scalable predictive model and validation for residual stress and distortion in selective laser melting*, CIRP Ann. 67 (2018) 249–252. doi:10.1016/j.cirp.2018.04.105.
- [8] J.A. Pozo-Morejón, P.E. Quintero-Acosta, A. Cruz-Crespo, E. Diaz-Cedré, *Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos*, Soldag. Amp Insp. 16 (2011) 256–264. doi:10.1590/S0104-92242011000300007.
- [9] C. Luo, J. Qiu, Y. Yan, J. Yang, C. Uher, X. Tang, *Finite element analysis of temperature and stress fields during the selective laser melting process of thermoelectric SnTe*, J. Mater. Process. Technol. 261 (2018) 74–85. doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.06.001.
- [10] Y. Li, K. Zhou, P. Tan, S.B. Tor, C.K. Chua, K.F. Leong, *Modeling temperature and residual stress fields in selective laser melting*, Int. J. Mech. Sci. 136 (2018) 24–35. doi:10.1016/j.ijmecsci.2017.12.001.
- [11] L.-E. Loh, C.-K. Chua, W.-Y. Yeong, J. Song, M. Mapar, S.-L. Sing, Z.-H. Liu, D.-Q. Zhang, *Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061*, Int. J. Heat Mass Transf. 80 (2015) 288–300. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.014.
- [12] S. Shrestha, S. Rauniar, K. Chou, *Thermo-Fluid Modeling of Selective Laser Melting: Single-Track Formation Incorporating Metallic Powder*, J. Mater. Eng. Perform. (2018). doi:10.1007/s11665-018-3574-5.

- [13] N.P. Lavery, S.G.R. Brown, J. Sienz, J. Cherry, *A review of Computational Modelling of Additive Layer Manufacturing – multi-scale and multi-physics*, (n.d.) 23.
- [14] K.H. Leitz, P. Singer, A. Plankensteiner, B. Tabernig, H. Kestler, L.S. Sigl, *Thermo-Fluiddynamic Modeling of Laser Beam-Matter Interaction in Selective Laser Melting*, (2016).
- [15] S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, W.E. King, *Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones*, *Acta Mater.* 108 (2016) 36–45. doi:10.1016/j.actamat.2016.02.014.
- [16] W.S. Jodrey, E.M. Tory, *Simulation of random packing of spheres*, *Simulation.* 32 (1979) 1–12.
- [17] J. Zhou, Y. Zhang, J.K. Chen, *Numerical Simulation of Random Packing of Spherical Particles for Powder-Based Additive Manufacturing*, *J. Manuf. Sci. Eng.* 131 (2009) 031004. doi:10.1115/1.3123324.
- [18] H. Richter, *Mote3D: an open-source toolbox for modelling periodic random particulate microstructures*, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 25 (2017) 035011. doi:10.1088/1361-651X/aa629a.
- [19] K. Sobolev, A. Amirjanov, *The development of a simulation model of the dense packing of large particulate assemblies*, *Powder Technol.* 141 (2004) 155–160. doi:10.1016/j.powtec.2004.02.013.
- [20] J. Tobochnik, P.M. Chapin, *Monte Carlo simulation of hard spheres near random closest packing using spherical boundary conditions*, *J. Chem. Phys.* 88 (1988) 5824–5830.
- [21] L.E. Llamasa, L.G.M. Contreras, M.B. Arbelaez, *Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTCISO/IEC 17025*, *Sci. Tech.* 1 (2007).
- [22] Y.P. Paisan, J.P. Moret, *La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición*, *Tecnol. Quím.* 30 (2016) 117–121.
- [23] B09 Committee, *Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel*, ASTM International, n.d. doi:10.1520/B0212-17.
- [24] B09 Committee, *Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes Principle*, ASTM International, n.d. doi:10.1520/B0962-17.
- [25] D18 Committee, *Test Methods for Determining Loose and Tapped Bulk Densities of Powders using a Graduated Cylinder*, ASTM International, n.d. doi:10.1520/D7481-18.
- [26] Á. Alberich-Bayarri, L. Martí-Bonmatí, R. Sanz-Requena, J. Sánchez-González, V. Hervás Briz, G. García-Martí, M.Á. Pérez, *Reproducibilidad y exactitud en la cuantificación morfológica y mecánica del hueso trabecular a partir de imágenes de resonancia magnética de Tesla*, *Radiología.* 56 (2014) 27–34. doi:10.1016/j.rx.2013.06.001.
- [27] N.P. Karapatis, G. Egger, *Optimization of Powder Layer Density in Selective Laser Sintering*, (n.d.) 10.
- [28] K. Sobolev, A. Amirjanov, *The simulation of particulate materials packing using a particle suspension model*, (2007).