

MEMORIAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

ISSN: 2007-9540

NOVIEMBRE 2019

40 CIMM

SALTILLO COAH. MEXICO



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SALTILLO

**MEMORIAS DEL CONGRESO
INTERNACIONAL DE METALURGIA Y
MATERIALES**

**40 CIMM
2019**

EDITOR

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

COMPILADOR

DR. DAGOBERTO VÁZQUEZ OBREGÓN

Revista Electrónica

ISSN: 2007-9540

ANÁLISIS DE POLVO DE ALSI10MG VIRGEN Y REUTILIZADO EN FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER.

M. Orozco Sandoval¹, M. Hinojosa Rivera¹ y O. López Botello²

¹ Posgrado en Ingeniería En Materiales de la Subdirección de Posgrado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. 66455. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Advanced Manufacturing, School of Engineering and Sciences , Tecnológico de Monterrey. Monterrey, Nuevo León.

Autor de Correspondencia: maría.orozcosp@uanl.edu.mx, Tel. 8117990168

Resumen

Debido a que el impacto de la reutilización de polvos metálicos en técnicas de lecho en polvo en manufactura aditiva es poco conocido este ha tomado relevancia en los últimos años, en especial las últimas investigaciones se centran el estudio de aleaciones de aluminio y el cambio en la forma de las partículas conforme el material es sometido a ciclos continuos de fabricación. Este trabajo analiza el polvo de AlSi10Mg virgen y recuperado posterior a cinco ciclos por la técnica de fusión selectiva por láser (SLM), mediante el análisis de imágenes obtenidas por microscopio electrónico de barrido (SEM), evaluando tamaño de partículas y morfología; observando partículas con tamaño mayor 70 μm en el 6% de las partículas analizadas lo cual es relevante para la calidad de los componentes fabricados por SLM.

Palabras Clave

Manufactura aditiva, Selective laser melting, polvos, SLM, AlSi10Mg.

1. Introducción

La manufactura aditiva (AM) se conoce al conjunto de técnicas usadas para fabricar modelos solidos de datos virtuales eliminando restricciones geométricas o buscando personalizar componentes; A diferencia de la fabricación convencional sustractiva procesos, en los que se utiliza una herramienta para eliminar material no deseado de una pieza de trabajo, la fabricación aditiva (AM) es definida por ASTM como "un proceso de unión de materiales para hacer objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa sobre capa" [1]–[5].

Esta colección de tecnologías de procesamiento de materiales en especial las relacionadas con metales como por ejemplo la fusión selectiva por láser (SLM) la cual ha sido probablemente la técnica de prototipado, han atraído mucha atención científica porque ofrece una producción de formas casi netas de geometrías casi ilimitadas y un potencial para el control puntual de la microestructura. y propiedades mecánicas, adicionalmente

estas técnicas se promocionan por su capacidad para proporcionar mejora significativa en el rendimiento de elementos, así como reducciones en los costos de fabricación, el tiempo de entrega o ambos, para los procesos de lecho de polvo solo tiene sentido económicamente si el polvo se recicla y reutiliza continuamente. La variabilidad de las piezas debido a la reutilización del polvo es aún desconocida, por lo que requiere una mayor investigación antes con el fin de definir límites de utilización y especificaciones [1]–[3].

Las investigaciones sobre manufactura aditiva se han centrado en su mayoría en conocer los múltiples parámetros del procedimiento como la intensidad del láser, el espesor de la capa y la dirección de construcción esto con el fin de que los elementos fabricados por estas técnicas tengan propiedades mecánicas competitivas, sin embargo, otros factores como las características del polvo y la cantidad de ciclos de reutilización han recibido una menor atención. Uno de los principales beneficios de la técnica SLM es la posibilidad de reutilizar el polvo no fundido lo cual hace esta técnica costo-efectiva y sustentable, sin embargo las partículas interactúan con la fuente de energía lo cual entre reutilizaciones puede ocasionar variaciones en el comportamiento del polvo, estas variaciones pueden ser un factor en la creación de defectos y provocar cambios en los componentes finales; lo cual hace que sea un desafío importante el comprender completamente como las prácticas de tamizado, la manipulación del polvo y los procesamientos previos influyen en la calidad de los componentes considerando que solamente entre el 10-50% del área de construcción es utilizada lo cual hace que un gran porcentaje de polvo sea sobrante y quede disponible para ser reutilizado lo cual minimiza los costos de fabricación por AM [6]–[10].

Aunque se han hecho investigaciones previas de la reutilización de polvo en AM, estas se centran principalmente en otras aleaciones, y son pocas en las que las aleaciones de aluminio es el principal material investigado lo cual hace que se requiera realizar una mayor cantidad de trabajo con el fin de definir límites y especificaciones, ya que la degradación depende en gran medida del material utilizado, las condiciones de procesamiento y el ambiente; reportes en los que el Ti6Al4V ha sido sometido a 25 ciclos y los cambios son relativamente menores, sin embargo en aleaciones de aluminio se reporta una degradación en las propiedades mecánicas desde el primer ciclo de reutilización cuando se utiliza una energía de laser alta lo cual se ve reflejado en la aparición de poros entre capas además de observarse diferencias notorias entre el polvo virgen y reutilizado en función de la morfología tamaño de partícula y composición [8], [11]–[13].

La motivación detrás de esta investigación proviene de la falta de métodos estadísticos que evalúen la calidad del polvo reutilizado estableciendo sirvan de monitoreo a calidad de polvo y su interacción con el proceso de SLM en polvo de AlSi10Mg, buscando características geométricas y morfológicas de las partículas de polvo reutilizado comparando contra polvo virgen y su efecto en la formación de defectos mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos proporcionando una visión general del proceso y los componentes fabricados por esta técnica, debido a estas razones, así como al deseo abrumador de producir componentes funcionales, es la necesidad de tener una gran atención en el uso de polvos metálicos en los procesos de manufactura aditiva de lecho en polvo [10], [14], [15].

2. Metodología

2.1. Características del polvo

La aleación seleccionada AISi10Mg la cual contiene 9.0–11.0 wt% de silicio y magnesio 0.2–0.45 wt% y ya que la reutilización de polvo metálico en las técnicas de manufactura aditiva de lecho en polvo es común, imágenes en SEM del polvo virgen y reutilizado de AISi10Mg se observan en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a) y Fig. 1 b), en el polvo virgen se observan partículas sub-angulares, angulares y muy angulares con agrupaciones de partículas y satélites a diferencia del polvo reutilizado en donde las partículas observadas en su mayoría son muy angulares así como una presencia menor de aglomeraciones y partículas satélite, similar a lo reportado en la literatura y el porcentaje de presencia de partículas en función de la circularidad se puede observar en la Fig. 2 y esta se calcula mediante Ecuación 1 donde A es el área de la partícula detectada y P es el perímetro y es reportado en la [16]–[19].

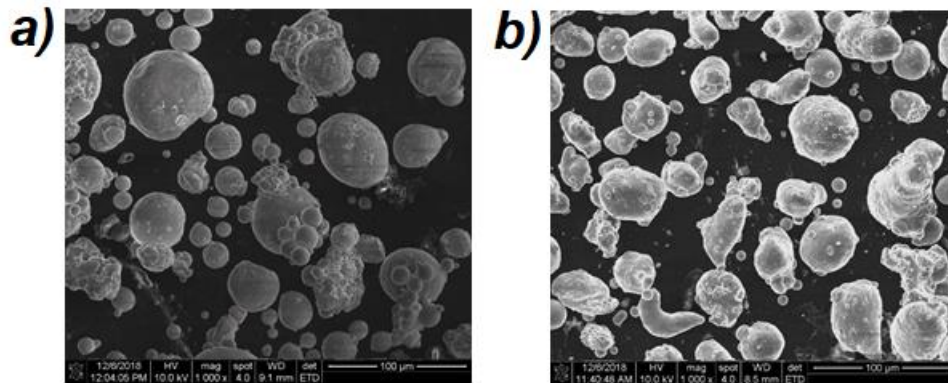


Fig. 1 a) Micrografía de partículas de polvo virgen de AISi10Mg, b) Micrografía de partículas de polvo reutilizado de AISi10Mg

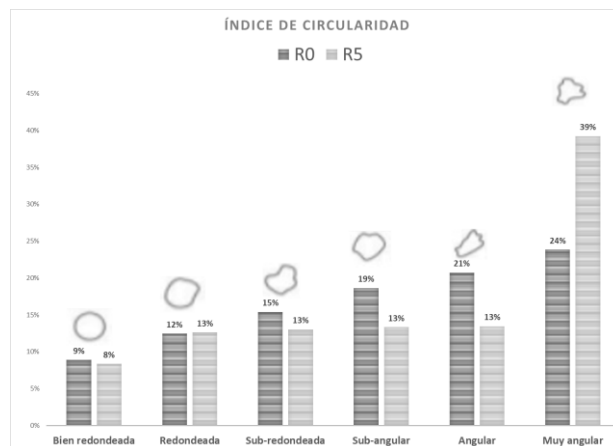


Fig. 2 Comparación entre la morfología de las partículas observadas en partículas vírgenes y reutilizadas de AISi10Mg

$$\text{Ecuación 1 } C = \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}}$$

El diámetro promedio de las partículas de polvo virgen $17.99 \mu\text{m}$ y para el polvo reutilizado de $25.35 \mu\text{m}$ realizando las mediciones con el software HAYEAR. SLM es un proceso metalúrgico físico complejo que involucra múltiples modos de transferencia de masa, calor y momento, y depende significativamente de los parámetros de procesamiento dentro de los cuales el tamaño del polvo es primordial ya que este sería el primer paso para establecer un índice objetivo de calidad aplicable al polvo y de este se asocian muchos métricos de forma de partícula como la circularidad, esta forma de medición es relativamente simple lo que la hace aplicable y accesible para procesos de manufactura aditiva, en la Fig. 3 a) y Fig. 3 b), observando que para el polvo virgen se tiene un rango menor en los diámetros de las partículas a diferencia de las partículas del polvo reutilizado el cual presenta un diámetro mayor lo cual es consistente con el cambio de la morfología en observado [6], [20]–[22].

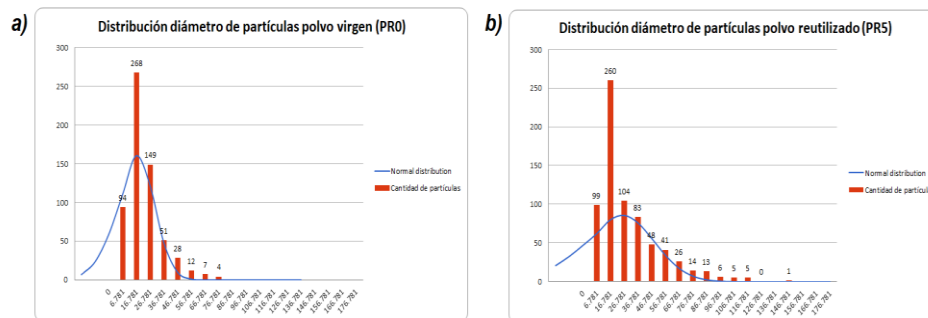


Fig. 3 Distribución del diámetro de partículas: a) polvo virgen, b) polvo reutilizado.

2.2. Procesamiento por SLM

El polvo reutilizado en este trabajo fue recolectado posterior a la fabricación de componentes usando el proceso de fusión láser de lecho de polvo de la máquina Renishaw AM250. Utiliza un láser de fibra de iterbio en modo Q-conmutado con una potencia máxima de 200 W y un diámetro nominal del punto láser de $70 \mu\text{m}$, tamizado con una malla de $75 \mu\text{m}$ [23], [24].

3. Discusión de resultados

La reutilización continua del polvo afecta las características del polvo de AlSi10Mg y en los componentes finales, uno de los principales cambios que se observan es el cambio en el diámetro promedio de las partículas reutilizadas siendo que el diámetro promedio de las partículas reutilizadas es un 41% mayor que el de las partículas vírgenes similar a lo reportado por Quinn y colaboradores en el 2019 [25], para la aleación de acero EOS 316 sin embargo la diferencia principal en esta investigación es que el material tuvo una mayor exposición a la fuente de calor y el cambio en el tamaño de las partículas se presentó en un porcentaje menor, ya que las partículas reutilizadas en aproximadamente 17 ciclos presentaron un diámetro promedio 5% mayor que al polvo virgen a diferencia del polvo de esta investigación el cual fue sometido a 25 horas de exposición con un cambio del 41% con diferencia al polvo reutilizado.

Previa reutilización del polvo se realiza un tamizaje, el cual es de suma importancia para separar partículas cuyo diámetro sea mayor a la capa de construcción para los procesos de SLM, en el caso del polvo reutilizado las partículas mayores a 75 μm posterior el tamizaje es de un 6% y el área de las partículas grandes es de un 14% del total de las partículas analizadas, a diferencia del polvo virgen en el cual solamente el 1% tuvo un tamaño mayor de 75 μm que corresponde al 2% del área total de las partículas, la importancia del tamizaje es establecido por Cordova y colaboradores en el 2019 [6], en dicho estudio se determina que el AlSi10Mg muestra mayor variación a diferencia Ti6Al4V que es el que muestra menor influencia en las reutilizaciones.

Los cambios en la morfología de las partículas reutilizadas que en el caso del AlSi10Mg pueden ser atribuidos a la fusión de partículas pequeñas con partículas mayores lo cual se pone de manifiesto en la superficie de las partículas del polvo reutilizado en las cuales se observan aglomeraciones en la superficie, similar a lo reportado por Quinn y colaboradores en el 2019 y el fenómeno es reportado por Barclift y colaboradores en el 2016 [26] para los procedimientos de lecho en polvo.

4. Conclusiones

Se propone un método simplificado para evaluar los cambios morfológicos que ocurren en los polvos conforme sean reutilizados, ya que cualquier cambio en morfología afecta el proceso de SLM que permita explicar las diferencias observadas entre el polvo virgen y reutilizado de la aleación AlSi10Mg, siendo la conclusión general que la reutilización del polvo produce cambios significativos en la morfología de las partículas, las conclusiones más específicas sobre el efecto de la reutilización del polvo son:

- 1) La aleación de AlSi10Mg es susceptible al cambio de en el tamaño de las partículas desde un quinto ciclo de reutilización o 28 horas de procesamiento.
- 2) El tamizaje del polvo reutilizado es sumamente importante para la calidad de los componentes en especial con el AlSi10Mg ya que muestra una sensibilidad mayor a la reutilización.
- 3) La morfología de las partículas de AlSi10Mg presentan cambios significativos a partir de un quinto ciclo de reutilización presentando partículas muy angulares

5. Agradecimientos

Esta investigación es apoyada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, el Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología (CIIDIT) y el Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA), especialmente Dr. Enrique López Cuellar, Dr. Alejandro Torres y M.C. Frank Meléndez por el apoyo en esta investigación.

6. Referencias

- [1] E. J. Schwalbach, S. P. Donegan, M. G. Chapman, K. J. Chaput, and M. A. Groeber, "A discrete source model of powder bed fusion additive manufacturing thermal history," *Addit. Manuf.*, vol. 25, no. November 2018, pp. 485–498, 2019.
- [2] A. Boschetto, V. Giordano, and F. Veniali, "Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 9–12, pp. 945–956, 2012.
- [3] J. A. Slotwinski and E. J. Garboczi, "Metrology Needs for Metal Additive Manufacturing Powders," *Jom*, vol. 67, no. 3, pp. 538–543, 2015.
- [4] ASTM INTERNATIONAL, "ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," *ASTM Standards*. pp. 1–3, 2013.
- [5] C. Pleass and S. Jothi, "Influence of powder characteristics and additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by Selective Laser Melting," *Addit. Manuf.*, vol. 24, no. September, pp. 419–431, 2018.
- [6] L. Cordova, M. Campos, and T. Tinga, "Revealing the Effects of Powder Reuse for Selective Laser Melting by Powder Characterization," *Jom*, vol. 71, no. 3, pp. 1062–1072, 2019.
- [7] M. J. Heiden *et al.*, "Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process," *Addit. Manuf.*, vol. 25, no. November 2018, pp. 84–103, 2019.
- [8] M. J. O. Brien, "Development and qualification of additively manufactured parts for space parts for space," *Opt. Eng.*, vol. 58, no. 1, p. 11, 2019.
- [9] T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, and G. Chen, "Sustainability of additive manufacturing : An overview on its energy demand and environmental impact," *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. June 2017, pp. 694–704, 2018.
- [10] A. T. Sutton, C. S. Kriewall, M. C. Leu, and J. W. Newkirk, "Powders for Additive Manufacturing Processes: Characterization Techniques and Effects on Part Properties," *Solid Free. Fabr. Proc.*, pp. 1004–1030, 2016.
- [11] K. Thejane, S. Chikosha, and W. du Preez, "Characterisation and Monitoring of Ti6Al4V (Eli) Powder Used in Different Selective Laser Melting Systems," *South African J. Ind. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 161–171, 2017.
- [12] C. Li, S. Sun, C. Liu, Q. Lu, P. Ma, and Y. Wang, "Microstructure and mechanical properties of TiC/AlSi10Mg alloy fabricated by laser additive manufacturing under high-frequency micro-vibration," *J. Alloys Compd.*, vol. 794, pp. 236–246, 2019.
- [13] D. Bourell *et al.*, "Materials for additive manufacturing," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017.
- [14] N. Takata, H. Kodaira, K. Sekizawa, A. Suzuki, and M. Kobashi, "Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 704, no. May, pp. 218–228, 2017.
- [15] X. Liu, C. Zhao, X. Zhou, Z. Shen, and W. Liu, "Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy," *Mater. Des.*, vol. 168, p. 107677, 2019.
- [16] A. Boschetto, L. Bottini, and F. Veniali, "Roughness modeling of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 241, pp. 154–163, 2017.
- [17] Y.-R. Kim, M. Haft-Javaherian, and L. S. Castro, "Two-Dimensional Virtual Microstructure Generation of Particle-Reinforced Composites," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 1, p. 04014112, 2014.
- [18] N. Kaufmann, M. Imran, T. M. Wischeropp, C. Emmelmann, S. Siddique, and F. Walther, "Influence of process parameters on the quality of aluminium alloy en AW 7075 using Selective Laser Melting (SLM)," *Phys. Procedia*, vol. 83, pp. 918–926, 2016.
- [19] R. Esmailizadeh, U. Ali, A. Keshavarzkermani, Y. Mahmoodkhani, E. Marzbanrad, and E. Toyserkani, "On the effect of spatter particles distribution on the quality of Hastelloy X parts made by laser powder-bed fusion additive manufacturing," *J. Manuf. Process.*, vol. 37, no. November 2018, pp. 11–20, 2019.
- [20] N. Read, W. Wang, K. Essa, and M. M. Attallah, "Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation

- and mechanical properties development," *Mater. Des.*, vol. 65, pp. 417–424, 2015.
- [21] P. Yuan, D. Gu, and D. Dai, "Particulate migration behavior and its mechanism during selective laser melting of TiC reinforced Al matrix nanocomposites," *Mater. Des.*, vol. 82, pp. 46–55, 2015.
- [22] Z. Snow, R. Martukanitz, and S. Joshi, "On the development of powder spreadability metrics and feedstock requirements for powder bed fusion additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 28, no. November 2018, pp. 78–86, 2019.
- [23] N. P. Lavery *et al.*, "Effects of hot isostatic pressing on the elastic modulus and tensile properties of 316L parts made by powder bed laser fusion," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 693, no. March, pp. 186–213, 2017.
- [24] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young, J. Huang, and W. Zhu, "Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 628, pp. 238–246, 2015.
- [25] P. Quinn, S. O'Halloran, J. Lawlor, and R. Raghavendra, "The effect of metal EOS 316L stainless steel additive manufacturing powder recycling on part characteristics and powder reusability," *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 348–359, 2019.
- [26] B. Michael, J. Sanjay, S. Timothy, and D. Corey, "Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing," *Proc. 27th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp.*, vol. 44, no. 3, pp. 52–54, 2016.