

Análisis estadístico de parámetros de fabricación en AlSi10Mg mediante Manufactura Aditiva de metales

Statistic Analysis of the fabrication parameters of Metal Additive Manufacturing of AlSi10Mg

Malena Ley Bun Leal^{1,2}, Carlos Garza^{1,3}, Bárbara Bermúdez Reyes^{1,2}, Patricia del C. Zambrano Robledo^{1,2}, Omar E. López Botello^{2,4,*}

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

³CONACYT

⁴Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Monterrey, Nuevo León, 64849, México.

*omarlopez@tec.mx

Resumen

El proceso de Manufactura Aditiva (MA) de Fusión Selectiva Laser (SLM, por sus siglas en inglés) involucra una gran cantidad de parámetros de fabricación, y las interacciones entre ellos definen las características finales de la pieza resultante. Piezas con baja densidad es uno de los principales problemas en piezas manufacturadas mediante SLM, debido a la incorrecta selección de parámetros de fabricación. Esto es poco deseable para aplicaciones altamente especializadas, tales como aplicaciones aeronáuticas, aeroespaciales y médicas. En el presente trabajo de investigación se realizó un análisis estadístico de parámetros de fabricación de estructuras delgadas en AlSi10Mg mediante SLM con el fin de maximizar la densidad de las mismas. Los parámetros de fabricación se determinaron con base en un diseño de experimentos Ortogonal robusto, los cuales fueron programados en el equipo de fabricación SLM para la obtención de muestras. La densidad relativa de las muestras fue caracterizada utilizando el principio de Arquímedes, con los datos obtenidos se determinó el modelo estadístico para la predicción de parámetros óptimos. Finalmente se analizó el error obtenido del modelo con respecto a las mediciones para determinar la confiabilidad del mismo.

Abstract

The Additive Manufacturing (AM) process of Selective Laser Melting (SLM) involves numerous fabrication parameters, the interaction between those parameters determine the final characteristics of the resulting part and because of the latter, it is considered a complex process. Low-density components is one of the main issues of the SLM process, due to the incorrect selection of process parameters. These defects are undesired in high specialized applications (i.e. aerospace, aeronautic and medical industries). Therefore, the optimization of the SLM process parameters of the thin structures of AlSi10Mg was performed. A robust orthogonal design of experiments was used to determine the process parameters, then parts were manufactured in SLM. Relative density of the samples was then characterized using the Archimedes principle; the data was then statistically analyzed in order to determine the optimal process parameters. Afterwards, error was analyzed to determine the reliability of the statistical model in relation with the experimental measurements.

Palabras clave:

Manufactura aditiva de metales, AlSi10Mg, Densidad relativa, Diseño de experimentos, Taguchi

Keywords:

Metal Additive Manufacturing, AlSi10Mg, relative density, design of experiments, Taguchi

Introducción

La Manufactura Aditiva (MA) permite la fabricación de piezas con alto nivel de complejidad y de menor peso que aquellas obtenidas mediante métodos de fabricación tradicionales. Esta versatilidad ha atraído la atención de diversas industrias, tales como las industrias aeronáutica y aeroespacial. El proceso de MA se caracteriza por fusionar capas de material de manera sucesiva para formar la pieza deseada, al contrario de otras técnicas, donde se logra el resultado final removiendo material hasta obtener la forma deseada [1].

La tecnología de Fusión Selectiva Láser (SLM por sus siglas en inglés) es una tecnología que utiliza material en forma de polvo metálico como su materia prima. El proceso (Figura 1) comienza en una cámara cerrada con atmósfera de un

gas inerte (usualmente Argón) con una base o sustrato de un material compatible al utilizado en el proceso. Un dispersor de polvo, comúnmente conocido como “wiper” deposita una capa de grosor determinado (generalmente el grosor de capa es de 20 a 70µm). Subsecuentemente, el láser funde de manera localizada en polvo, siguiendo un patrón definido de acuerdo a la geometría de la pieza[2].

Uno de los retos más importantes en recientes investigaciones referentes a la tecnología SLM es la obtención de piezas libres de poros y grietas[3, 4]. Los defectos y características de las piezas manufacturadas mediante SLM dependen de la potencia y velocidad de barrido del láser, así como de la distancia de espaciamiento entre las líneas de barrido (HS por

sus siglas en inglés) [1,5–8]. Por otro lado, se ha demostrado que el flujo de gas inerte en la cámara afecta, al igual que las características mencionadas anteriormente, la porosidad de las piezas [1].

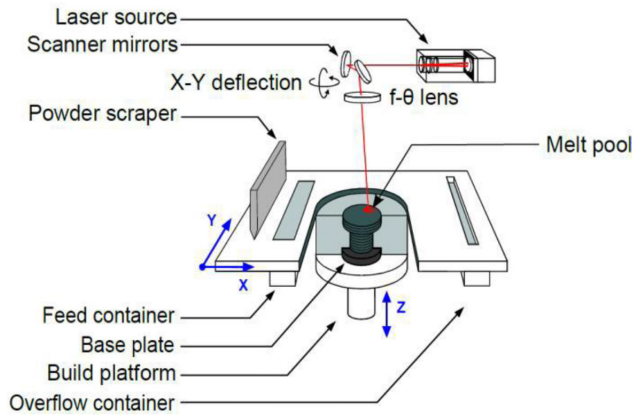


Figura 1. Diagrama esquemático del proceso de SLM [3].

Los parámetros mencionados se involucran entre sí para describir un término conocido como densidad de energía (2). Esta se refiere a la forma en que la energía que transmite el láser se distribuye en la cama de polvos [9]. Los láseres utilizados en manufactura aditiva generalmente tiene un perfil gaussiano de intensidad donde el centro del láser es el punto más caliente, conforme se va alejando de este punto, la propagación de la energía disminuye [6,9,10]. El tamaño del punto caliente o radio del láser puede modificarse mediante el desplazamiento del plano de enfoque el mismo (Figura 2), alterando así el tamaño del perfil gaussiano del láser y por lo tanto la forma en que se distribuye la energía en la cama de polvos [6]. Las ecuaciones (3-5) describen la relación entre el enfoque y el radio del láser.

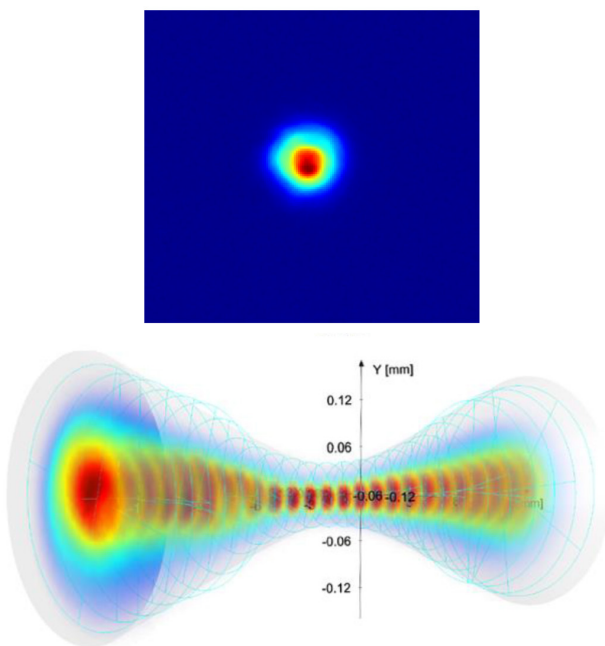


Figura 2. Perfil Gaussiano del láser observado de manera superficial y su relación con el plano de enfoque [9].

La optimización de parámetros se realiza mediante técnicas estadísticas de diseño de experimentos (DoE, por sus siglas en inglés). El proceso de DoE consiste en determinar entradas del proceso (conocidas como factores), influyentes en el resultado que se busca optimizar. Para cada factor, se determinan valores categóricos o continuos dentro de un rango previamente determinado para finalmente realizar una matriz con un arreglo de combinaciones de los factores [6–9]. Con base en los resultados obtenidos para cada combinación de parámetros se realiza un análisis estadístico que ayuda a determinar los parámetros que tienen mayor efecto en el proceso [15].

El diseño de experimentos de Taguchi se basa en un arreglo ortogonal de factores, el cual tiene la ventaja de crear una matriz con el menor número de experimentos posibles, comparado con otro tipo de diseños, como un diseño factorial completo o un diseño de Un Factor a la Vez (UFaV) [11, 12]. Taguchi permite un proceso de optimización más rápido y económico al generar menor número de muestras, lo cual se refleja en un menor consumo de material, potencia eléctrica y menor tiempo de preparación y análisis de las piezas [11].

Se han realizado estudios donde se utiliza SLM para el procesamiento de la aleación AlSi10Mg para distintas aplicaciones en los cuales se busca la optimización de parámetros para la obtención de piezas con alta densidad y buenas propiedades mecánicas[3,16,18–21]. La mayoría de estos estudios se realizan con probetas en forma de cubos las cuales no son representativas para piezas de geometrías más complejas con secciones delgadas. Es por eso que el objetivo de este trabajo es obtener parámetros óptimos de fabricación de estructuras delgadas mediante SLM en AlSi10Mg, de manera que se obtenga la mayor densidad relativa posible.

Materiales y métodos

Las muestras se fabricaron de polvo de la aleación Al-Si10Mg del proveedor LPW Technologies, la composición química proporcionada por el fabricante se muestra en la Tabla 1; en un equipo SLM Solutions modelo SLM 280HL, el cual cuenta con un láser de fibra que provee una potencia máxima de 400W, un volumen máximo de construcción de 280x280x365mm, dentro de una cámara cerrada con atmósfera de Argón, el cual mantiene los niveles de oxígeno por debajo del 5% y una presión de aproximadamente 14 mbar.

Tabla 1. Composición química de la aleación AlSi10Mg en porcentaje en peso

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Si	Sn	Ti	Zn
Min			0.25				9.0			
Max	0.05	0.25	0.45	0.10	0.05	0.02	11.0	0.02	0.15	0.1

En la Figura 2 se muestran las probetas obtenidas orientadas tal cual como se acomodaron en la cama de polvos. Cabe señalar que cada probeta tiene geometría rectangular de dimensiones de 10x10x3mm.

Se utilizó el principio de Arquímedes para determinar la densidad de las piezas. Como fluido de trabajo se utilizó agua destilada. El proceso se realizó a temperatura de 22°C.



Figura 3. Orientación de las probetas en la cámara de impresión.

Diseño de experimentos

Para el DoE se realizó una combinación de Diseño de Taguchi y el diseño UFaV, de manera que la fabricación de las probetas resultara más sencilla. Se realizó el Diseño de Taguchi tomando como factores el HS, la potencia del láser (P), la velocidad de escaneo del láser (V) y el enfoque del láser (F) con tres niveles para cada factor, obteniendo así una matriz con 9 experimentos (Tabla 2). Los 3 niveles seleccionados se basaron en el amplio rango de trabajo del equipo utilizado, agregando un valor medio para observar el comportamiento del material en condiciones menos extremas. Esta matriz se realizó para 3 grosores de capa de polvos (GC), 30, 40 y 50 μm de manera que se obtuvieron 27 experimentos que pudieron realizarse en 3 ciclos de impresión. Se fabricaron 5 repeticiones de cada set de parámetros. La temperatura del sustrato se mantuvo a 200°C durante las tres corridas de impresión.

Tabla 2. Factores y niveles para la impresión de la aleación AlSi10Mg mediante SLM

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
GC (μm)	30	40	50
HS (mm)	0.1	0.13	0.15
P (W)	200	300	400
V (mm/s)	1000	1500	2000
F (mm)	0	0.5	1

De acuerdo al método de Taguchi, los resultados obtenidos de densidad se analizaron en función de la razón entre señal y ruido (S/N por sus siglas en inglés). En este caso se busca obtener la mayor densidad relativa posible, por lo que se

busca que la razón S/N sea lo más grande posible, o como se conoce, entre mayor es mejor. Esta razón se calcula mediante la ecuación (1):

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

donde n es el número total de experimentos, y y_i el valor de densidad para el i-ésimo experimento.

Finalmente, para determinar el nivel de significancia que tiene cada factor en el valor de la densidad relativa, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA).

Resultados y discusión.

De los 27 experimentos el valor más alto de densidad relativa obtenido fue de 90.65% para el set de parámetros de 30 μm de capa, 0.1mm de HS, 400W de potencia del láser, 2000mm/s de velocidad y enfoque de 1mm. El valor más bajo obtenido fue de 81.75%, para la combinación de parámetros de 50 μm de grosor de capa, 0.15mm de HS, 200W de potencia, una velocidad de 2000mm/s y un enfoque de 0.5mm. Los valores promedio de densidad obtenidos en cada experimento con su respectiva desviación estándar se muestran en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se muestran los valores de S/N para cada factor, clasificados en los 3 niveles estudiados. Para este caso, el valor Delta, o la diferencia entre el S/N de cada nivel, es mayor para la potencia. Esto nos indica que es el factor más significativo o que tiene mayor influencia en la densidad relativa resultante de la pieza.

En la Figura 3 se muestra la gráfica de efectos principales basados en el S/N para la densidad relativa. Se puede observar, el factor que tiene una mayor variación es la potencia del láser, seguido del enfoque del láser en segundo lugar, en tercero el HS y cuarto la velocidad. En diferentes estudios, se ha demostrado que la densidad de las piezas depende de la densidad de energía (E), concepto que involucra a la potencia, velocidad y HS como se muestra en la ecuación (2) [9,16,22]:

$$E = \frac{P}{V \cdot HS \cdot GC} \quad (2)$$

También se ha demostrado que el enfoque está directamente relacionado en la densidad relativa, ya que modifica el tamaño del láser y por lo tanto la densidad de potencia (DP) que se suministra a la cama de polvos [6].

$$DP = \frac{P}{\pi \omega^2} \quad (3)$$

Tabla 3. Resultados experimentales de densidad relativa

Corridas	GC (μm)	HS (mm)	P (W)	V (mm/s)	F (mm)	Densidad de energía $\left(\frac{J}{mm^2}\right)$	Desviación estándar en las mediciones	Densidad relativa		% error
								Experimental	Predicha	
1	50	0.1	200	1000	0	519.69	0.111	89.307	89.083	0.251
2	50	0.1	300	1500	0.5	509.84	0.296	89.678	89.248	0.479
3	50	0.1	400	2000	1	482.40	0.296	89.595	89.414	0.202
4	50	0.13	200	1500	1	247.38	0.233	86.944	86.638	0.352
5	50	0.13	300	2000	0	299.82	0.095	88.575	87.165	1.592
6	50	0.13	400	1000	0.5	784.36	0.381	87.811	90.002	-2.495
7	50	0.15	200	2000	0.5	169.95	0.384	81.747	84.992	-3.970
8	50	0.15	300	1000	1	482.40	0.430	89.302	87.830	1.649
9	50	0.15	400	1500	0	461.95	0.482	89.758	88.356	1.562
10	40	0.1	200	1000	0	519.69	0.415	89.799	89.843	-0.049
11	40	0.1	300	1500	0.5	509.84	0.213	90.517	90.009	0.562
12	40	0.1	400	2000	1	482.40	0.239	90.342	90.175	0.185
13	40	0.13	200	1500	1	247.38	0.309	87.958	87.398	0.636
14	40	0.13	300	2000	0	299.82	0.314	88.662	87.925	0.831
15	40	0.13	400	1000	0.5	784.36	0.231	88.463	90.762	-2.599
16	40	0.15	200	2000	0.5	169.95	0.160	83.501	85.753	-2.697
17	40	0.15	300	1000	1	482.40	0.141	90.108	88.590	1.685
18	40	0.15	400	1500	0	461.95	0.238	90.243	89.117	1.248
19	30	0.1	200	1000	0	519.69	0.165	90.491	90.603	-0.124
20	30	0.1	300	1500	0.5	509.84	0.470	90.612	90.769	-0.174
21	30	0.1	400	2000	1	482.40	0.052	90.654	90.935	-0.310
22	30	0.13	200	1500	1	247.38	0.363	89.220	88.159	1.189
23	30	0.13	300	2000	0	299.82	0.527	89.473	88.685	0.880
24	30	0.13	400	1000	0.5	784.36	0.103	88.863	91.523	-2.993
25	30	0.15	200	2000	0.5	169.95	0.426	86.081	86.513	-0.501
26	30	0.15	300	1000	1	482.40	0.234	90.515	89.350	1.286
27	30	0.15	400	1500	0	461.95	0.128	90.496	89.877	0.684

donde ω es el radio del laser, el cual es descrito por la ecuación (4):

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2} \quad (4)$$

donde ω_0 es el radio mínimo del láser, z es la distancia de enfoque y Z_r es el rango de Rayleigh. Este rango se puede calcular con la ecuación (5):

$$Z_r = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (5)$$

donde λ es la longitud de onda del láser.

Tabla 4. Tabla de respuestas S/N para densidad relativa

Nivel	GC	HS	P	V	F
1	39.05	39.1	38.81	39.03	39.05
2	38.97	38.93	39.06	39.03	38.83
3	38.89	38.88	39.04	38.85	39.03
Delta	0.15	0.21	0.25	0.19	0.22
Rank	5	3	1	4	2

La mayoría de las investigaciones acerca del tema coinciden en que los parámetros más influyentes son P, HS y V debido a que de ellos depende la densidad de energía, pero no investigan el efecto que tiene el cambio del enfoque del láser en la distribución de dicha energía.

En la ecuación (4) se presenta como el cambio en el enfoque afecta principalmente en el tamaño del láser. Un cambio en el tamaño del láser se traduce en un cambio en el tamaño del

perfil gaussiano del láser y por lo tanto un cambio en el tamaño del punto caliente. Esto afecta la forma en que la energía se distribuye en las rastras de barrido del láser.

En [6] presentan como el cambio en el enfoque del láser tiende a reducir la densidad de energía sin modificar los parámetros de P, HS y V del láser. Debido a que en el DoE presentado se variaron todos los parámetros, se propone la ecuación (6), en la cual se involucra la DP en la ecuación de densidad de energía.

$$E = \frac{DP / HS}{V} \tag{6}$$

donde la densidad de energía queda expresada en J/mm^2 . Como se observa en la Tabla 2, existe un patrón con respecto a esta ecuación, donde valores muy grandes o muy pequeños de E dan como resultado una densidad relativa menor. Se encontró que para valores mayores a 250 y menores a 700 se observan mejores resultados de densidad relativa.

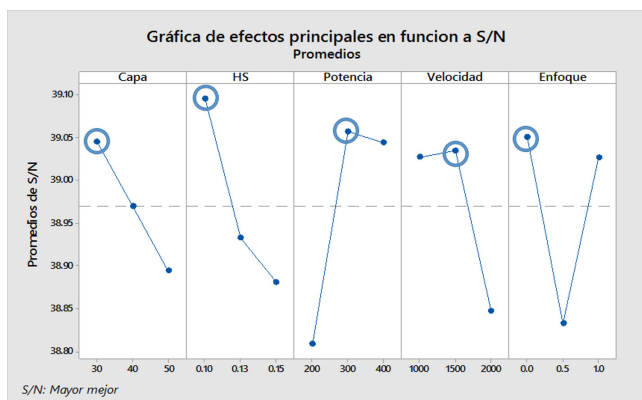


Figura 4. Gráfico de efectos principales en base a S/N

El gráfico de superficie de respuesta (Figura 4) muestra las interacciones que existen entre los parámetros más influyentes antes mencionados. Conforme el enfoque aumenta la densidad relativa disminuye, por otro lado, la densidad relativa aumenta al aumentar la potencia.

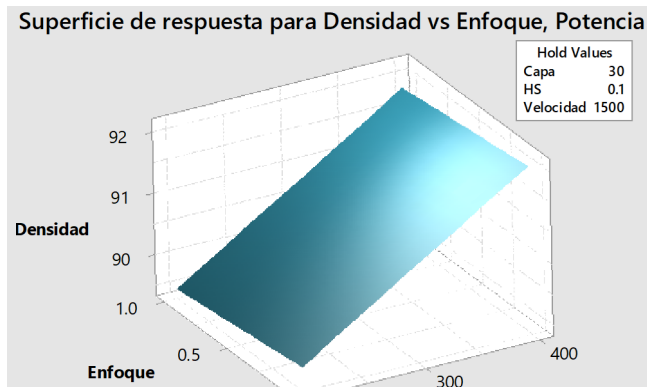


Figura 5. Gráfico de superficie de respuesta para la Densidad relativa en función de la potencia y el enfoque del láser.

Se realizó el ANOVA para confirmar los factores más influyentes del modelo, en la Tabla 5 se pueden observar con claridad que el factor más influyente es la potencia del láser, seguido por el enfoque y HS con porcentajes de contribución del 29.50%, 21.32% y 22.73% respectivamente.

Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal para obtener una ecuación que se ajuste al modelo. En la Tabla 3 se pueden observar los valores predichos y el porcentaje de error del modelo respecto a los valores experimentales medidos. La ecuación de regresión lineal obtenida se muestra en (7).

$$\begin{aligned} \% \text{ densidad relativa} &= 96.69 - 0.076(GC) - 43.8(Hs) + \\ &+ 0.0117(P) - 0.001781(V) - 0.241(F) \end{aligned} \tag{7}$$

Tabla 5. Resultados obtenidos del ANOVA

Factor	DF	Seq SS	% de contribución	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Capa	2	10.405	8.71%	10.405	5.2024	14.80	0.000
HS	2	22.737	19.03%	22.737	11.3687	32.34	0.000
Potencia	2	35.240	29.50%	35.240	17.6202	50.12	0.000
Velocidad	2	19.985	16.73%	19.985	9.9927	28.42	0.000
Enfoque	2	25.467	21.32%	25.467	12.7336	36.22	0.000
Error	16	5.625	4.71%	5.625	0.3516		
Total	26	119.460	100.00%				

DF, Grados de libertad; Seq. SS, Suma secuencial de cuadrados; Adj. SS, Suma de cuadrados ajustada; Adj. MS, Promedios cuadrados ajustados; F, prueba estadística; P, valor estadístico.

Los valores predichos se obtuvieron sustituyendo los parámetros en su respectivo término en la ecuación de regresión. Se observó que los valores predichos mostraron un porcentaje de error con respecto a los valores medidos menor al 3%. Adicionalmente, en la Figura 5 se muestra la gráfica de correlación las predicciones y los resultados experimentales. Se puede observar que existe una correlación aceptable entre dichos valores.

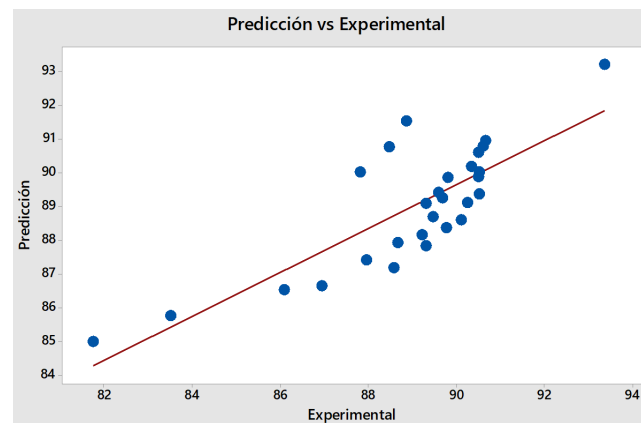


Figura 6. Gráfica de correlación entre los valores experimentales y predichos del porcentaje de densidad relativa.

Validación de la Optimización

La optimización de Taguchi nos indica que los valores con S/N más altos observados en el gráfico de efectos principales para cada factor son aquellos que darán mejor resultado, estos valores se encuentran encerrados en la Figura 2. En este caso los parámetros son un GC de 30 μ m, una HS de 0.1mm, P de 300W, con V de 1500mm/s y un F de 0. La densidad de energía calculada mediante la ecuación (6) para este conjunto de parámetros es de 519.69J/mm², la cual se encuentra dentro del rango de densidad de energía que observó de los mejores resultados. Utilizando la ecuación (7) se predijo que con los parámetros óptimos la densidad relativa sería de 93.198%.

Se realizó la manufactura de probetas con el set de parámetros optimizados, la densidad promedio obtenida fue de 93.36%, dando así un porcentaje de error con respecto a la predicción de 0.176%.

Conclusiones

Se aplicó el método de diseño de experimentos de Taguchi para realizar la optimización del proceso de SLM en la aleación AlSi10Mg. Se realizó el ANOVA para determinar los factores más influyentes en el proceso y se realizó un análisis de regresión para determinar la ecuación de regresión lineal del modelo. Finalmente se fabricaron muestras con parámetros optimizados y se validaron los resultados predichos. Las conclusiones más relevantes se resumen a continuación.

Se determinó con base en la literatura que los parámetros más importantes del proceso son el grosor de capa de polvos, la distancias entre rastras de escaneo, la potencia, velocidad y enfoque del láser.

El parámetro más significativo de todos resultó ser la potencia del láser con una contribución de 29.50% en la densidad relativa de la aleación AlSi10Mg procesada mediante SLM, seguida del enfoque con un 21.32%. Estos parámetros relacionados en la fórmula de densidad de energía nos dice que la densidad aumenta a mayor potencia del láser y menor distancia de enfoque, puesto que conforme se mueve el enfoque del láser, el tamaño del láser aumenta y se disminuye la densidad de potencia, ocasionando que exista polvo que no se funda completamente.

Con base en los niveles utilizados en este experimento, se predijo que la mayor densidad obtenida sería de 93.20%, correspondiendo a un grosor de capa de 30 μ m, una HS de 0.1mm, 300W de potencia, una velocidad de 1500mm/s y un enfoque de 0mm.

La validación experimental dio como resultado una densidad relativa de 93.36% y un porcentaje de error con respecto a la predicción de 0.176%.

El porcentaje de error observado entre los resultados experimentales y los predichos es menor al 3%, por lo cual el modelo es representativo al fenómeno observado.

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 noroeste de México.

Referencias

- [1] 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. (2018). doi:10.1016/j.addma.2018.05.005.
- [2] E. Herderick, *Additive manufacturing of metals: A review*, Mater. Sci. Technol. (2011) 1413.
- [3] J. Van Humbeeck, *PFC: AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting (SLM)*, 2013.
- [4] P.G.E. Jerrard, L. Hao, S. Dadbakhsh, K.E. Evans, *Consolidation behaviour and microstructure characteristics of pure aluminium and alloy powders following Selective Laser Melting processing*, in: Proc. 36th Int. MATA-DOR Conf., Springer, 2010: pp. 487–490.
- [5] M. Xia, D. Gu, G. Yu, D. Dai, H. Chen, Q. Shi, *Influence of hatch spacing on heat and mass transfer, thermodynamics and laser processability during additive manufacturing of Inconel 718 alloy*, Int. J. Mach. Tools Manuf. 109 (2016) 147–157.
- [6] G.E. Bean, D.B. Witkin, T.D. McLouth, D.N. Patel, R.J. Zaldivar, *Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting*, Addit. Manuf. 22 (2018) 207–215.
- [7] E. Louvis, P. Fox, C.J. Sutcliffe, *Selective laser melting of aluminium components*, J. Mater. Process. Technol. 211 (2011) 275–284. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019.
- [8] N.J. Harrison, I. Todd, K. Mumtaz, *Reduction of micro-cracking in nickel superalloys processed by Selective Laser Melting: A fundamental alloy design approach*, Acta Mater. 94 (2015) 59–68. doi:10.1016/j.actamat.2015.04.035.
- [9] V. Algara Muñoz, *Analysis of the optimal parameters for 3D printing aluminum parts with a SLM 280 machine*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.

- [10] K.-H. Leitz, P. Singer, A. Plankensteiner, B. Tabernig, H. Kestler, L.S. Sigl, *Multi-physical simulation of selective laser melting*, *Met. Powder Rep.* 72 (2017) 331–338.
- [11] S. Athreya, D.Y.D. Venkatesh, *Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation*, *Int. Refereed J. Eng. Sci.* 1 (n.d.) 13–19.
- [12] D. Joguet, S. Costil, H. Liao, Y. Danlos, *Porosity content control of CoCrMo and titanium parts by Taguchi method applied to selective laser melting process parameter*, *Rapid Prototyp. J.* 22 (2016) 20–30. doi:10.1108/RPJ-09-2013-0092.
- [13] Rajnikant B. Rathod, R. I. Patel, *Process parameter optimization of SLM process and application of Taguchi approach– The Review*, *IJSRD - Int. J. Sci. Res. Dev.* 1 (n.d.) 3.
- [14] M. Yakout, M.A. Elbestawi, S.C. Veldhuis, *Process-Structure-Property Relationship for Selective Laser Melting of Aerospace Alloys*, (2018).
- [15] D. Montgomery, *Análisis y diseño de experimentos*, Grupo Editor. Iberoam. (2005) 467.
- [16] N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, *Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting*, *Addit. Manuf.* 1–4 (2014) 77–86. doi:10.1016/j.addma.2014.08.001.
- [17] M. Yakout, A. Cadamuro, M.A. Elbestawi, S.C. Veldhuis, *The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 92 (2017) 2081–2098. doi:10.1007/s00170-017-0280-7.
- [18] Aqeel Ahmed, M. S. Wahab, A. A. Raus, K. Kamarudin, Qadir Bakhsh, Danish Ali, *Effects of Selective Laser Melting Parameters on Relative Density of AlSi10Mg*, *Int. J. Eng. Technol.* 8 (2016) 2552–2557. doi:10.21817/ijet/2016/v8i6/160806209.
- [19] M. Leary, M. Mazur, J. Elambasseril, M. McMillan, T. Chirent, Y. Sun, M. Qian, M. Easton, M. Brandt, *Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures*, *Mater. Des.* 98 (2016) 344–357.
- [20] N. Read, W. Wang, K. Essa, M.M. Attallah, *Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development*, *Mater. Des.* 1980-2015. 65 (2015) 417–424. doi:10.1016/j.matdes.2014.09.044.
- [21] S. Romano, S. Beretta, A. Brandão, J. Gumpinger, T. Ghidini, *HCF resistance of AlSi10Mg produced by SLM in relation to the presence of defects*, *Procedia Struct. Integr.* 7 (n.d.) 101–108. doi:10.1016/j.prostr.2017.11.066.
- [22] Y. Liu, C. Liu, W. Liu, Y. Ma, S. Tang, C. Liang, Q. Cai, C. Zhang, *Optimization of parameters in laser powder deposition AlSi10Mg alloy using Taguchi method*, *Opt. Laser Technol.* 111 (2019) 470–480.