

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



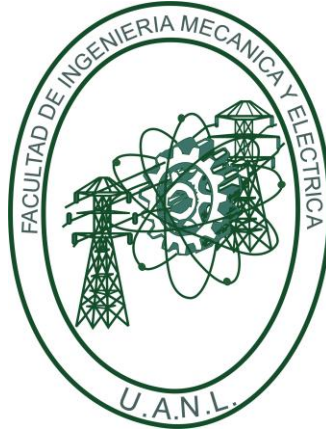
**EFFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE FUSIÓN SELECTIVA LÁSER EN
EL COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICO DE LA ALEACIÓN
DE ALUMINIO 6061**

Por

M.C. CATALINA JARAMILLO ISAZA

**Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES
OCTUBRE, 2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**EFFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE FUSIÓN SELECTIVA LÁSER EN
EL COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICO DE LA ALEACIÓN
DE ALUMINIO 6061**

**Por
M.C. CATALINA JARAMILLO ISAZA**

**Como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN INGENIERIA EN
MATERIALES
OCTUBRE, 2024**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Efecto de las variables del proceso de fusión selectiva láser en el comportamiento microestructural y mecánico de la aleación de aluminio 6061”, realizada por la estudiante Catalina Jaramillo Isaza, con número de matrícula 1698158, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo
Director

Dr. Omar Eduardo López Botello
Co-director

Dr. Arturo Juárez Hernández
Revisor

Dr. Edgar Omar García Sánchez
Revisor

Dra. Bárbara Bermúdez Reyes
Revisor

Dra. Gabriela Karina Pedraza Basulto
Revisor

Dra. Lizangela Guerra Fuentes
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 122608

Acta Núm. 356

Ciudad Universitaria, a 10 de octubre de 2024.

Agradecimientos

Quiero agradecerle primero a Dios por brindarme salud y sabiduría para poder culminar esta etapa de mi vida, Mi más profundo agradecimiento a la Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo por su dedicación y paciencia. Su dirección académica fue importante en mi crecimiento como investigadora, mi más profundo agradecimiento al Dr. Oscar Fabian Higuera porque su aporte científico y personal fue fundamental para dar forma a esta investigación y a formarme con la profesional que soy ahora; el Dr. Omar Eduardo López Botello por sus conocimientos, apoyo y tiempo brindado para lograr culminar mi proyecto.

Agradezco a mis padres porque ellos me enseñaron que en esta vida para lograr un propósito se debe ser perseverante y hacer las cosas con mucho amor, a pesar de estar lejos, siempre brindan el mejor de los apoyos y me aconsejan en cada etapa de mi vida.

Le agradezco el apoyo a mis compañeros y amigos Ariana Alvarado, Jamnie Achem, Oscar Flórez Betancurth, María del Carmen Ramírez, July Andrea Taborda y Loth Ivone Rodríguez, porque me acompañaron y apoyaron en todo momento brindándome su mano y conocimiento en esta investigación y aportaron su granito de arena en mi vida.

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo para la culminación de este proyecto a:

CONACYT por la beca otorgada que fue de gran valor para poder logro apoyar el desarrollo y culminación de esta investigación

A la Universidad Michoacana, CIMAV Chihuahua y Laboratorio de materiales de Tecnologías de flujo Emerson por el apoyo brindado con sus equipos y personal para poder realizar experimentos de esta investigación.

Dedicatoria.

A mi hijo Sergio Florez Jaramillo que es mi motor y mi gran amor

A mi padre Ancízar, mi madre Lucía y mi hermano Santiago; que me han dado la fortaleza necesaria para continuar y me han dado su amor incondicional a pesar de la distancia.

Tabla De Contenido

Agradecimientos	4
Dedicatoria	5
Resumen	12
CAPÍTULO 1	14
1.1. Hipótesis	16
1.2. Objetivo	16
1.3. Objetivos Específicos	17
CAPÍTULO 2	18
2.1 Manufactura Aditiva	18
2.1.1 Generalidades	18
2.1.2 Fusión Selectiva Láser (SLM)	22
2.1.3 Parámetros Que Influyen En La Fusión Selectiva Por Láser (SLM)	23
2.2 Aleaciones De Aluminio	27
2.2.1 Generalidades	27
2.2.2 Clasificación De Las Aleaciones De Aluminio	28
2.2.3 Aleación AA6061	29
2.3 Propiedades Físicas	30
2.3.1 Densidad Relativa	30
2.3.2 Microscopia Electrónica De Barrido (MEB)	31
2.3.3 Difracción De Electrones Retrodispersados (EBSD)	32
2.4 Evolución del AA6061 en SLM	33
CAPÍTULO 3	39
3.1 Selección de los parámetros del proceso de fabricación.	40
3.2 Fabricación por medio de fusión selectiva por láser (SLM).	40
3.3 Caracterización de defectos por microscopia electrónica de barrido (MEB).	42
3.4 Caracterización del material por microscopia electrónica de barrido (MEB) y analizador de tamaño de partículas (PSD).	43

3.5 Caracterización del material por medio de difracción de rayos X (DRX).	43
3.6 Caracterización de análisis térmico diferencial.	44
3.7 Caracterización microtextural por medio de difracción de electrones retrodispersados (EBSD).	44
3.8 Densidad relativa por medio de la técnica de Arquímedes.	45
3.9 Ensayo de tensión estática.	45
3.10 Ensayo de perfil de dureza.	47
3.11 Ensayo de fatiga.	47
CAPÍTULO 4	50
4.5 Caracterización microestructural.	60
CAPÍTULO 5	71
CAPÍTULO 6	73
ANEXOS	78

Listado De Figuras

Figura 1. Flujo de trabajo de la manufactura aditiva.	18
Figura 2. Gráfica de crecimiento mundial de la manufactura aditiva en miles de millones de dólares en venta de producto [14].....	19
Figura 3. Clasificación de la manufactura aditiva según su materia prima [16].	21
Figura 4. Representación esquemática del proceso de SLM [25].....	23
Figura 5. Esquema de los parámetros del proceso que modifican las propiedades finales de las piezas.	23
Figura 6. Medida de la intensidad del rayo láser según el radio [19].	24
Figura 7. Representación del barrido del láser en la capa de polvo [22].	26
Figura 8. Estrategias de escaneo; (a) trayectoria simple, (b) trayectoria llamada “escaneo por islas” (TD = dirección transversal; SD = dirección de escaneo; BD = dirección longitudinal) [24].	27
Figura 9. Clasificación de las aleaciones de aluminio según sus composiciones químicas [29].....	29
Figura 10. Método de Arquímedes para hallar la densidad relativa [32].	31
Figura 11. Funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido.	31
Figura 12. Proceso de indexación por medio de la técnica EBSD.	33
Figura 13. Fisuras en caliente formadas en la SLM AA-7075 a lo largo de la dirección de fabricación [69].	35
Figura 14. Crecimiento dendrítico se sustituyen por grietas en la microestructura equiaxada (Kaufmann et al) [69].	35
Figura 15. Microestructura de las muestras de Al6061 procesadas con diferentes parámetros de proceso SLM (a) 300 W, 100 0mm/s, 52.6% en la dirección Z; (b) 300 W, 1000 mm/s, 52.6% en el plano XY [51].	36
Figura 16. Imagen de microscopio óptico de las superficies pulidas [42].	36
Figura 17. Parámetros con valor alto de densidad relativa para el Al6061 [47].	37
Figura 18. Esquema que muestra la distancia entre capas de escaneo y los traslapes durante el proceso de fusión selectiva por láser [24].	38
Figura 19. Diseño metodológico para el desarrollo de la tesis.	39
Figura 20. Máquina de fusión selectiva láser del CIIIA-FIME-UANL.	42
Figura 21. Microscopio electrónico de barrido Jeol JSLM-6510-LVM.	42
Figura 22. Difractómetro de Rayos X Panalytical Empyrean.	43
Figura 23. Equipo SEM con módulo de difracción de electrones retrodispersados para obtener la información de textura del material.	45
Figura 24. Kit de determinación de densidad adherido a la balanza Ohaus AV53X.	45

Figura 25. Muestra de tensión fabricada de acuerdo con la norma ASTM E8.....	46
Figura 26. Máquina universal servo-hidráulica Instron 5960.	46
Figura 27. Durómetro Knoop/Vickers 400 series de Wolpert Wilson instruments.	47
Figura 28. Máquina universal servo-hidráulica Instron 5960	48
Figura 29. Material de Prueba para ensayo de fatiga fabricado por SLM.....	48
Figura 30. Imágenes de SEM del AA6061 en secundarios.	50
Figura 31. (a) Distribución normal de partículas del polvo Al6061 encontradas en el material utilizado en este estudio. (b) Estudio de Ihsan de distribución de polvo de diferentes estudios de Ihsan [20].....	51
Figura 32. Patrones de DRX del polvo de AA6061 y de las muestras procesadas por SLM.	52
Figura 33. Curvas DTA del AA6061 en polvo y ya impreso por medio de la técnica SLM. ...	53
Figura 34. Distribución de las muestras impresas en el equipo SLM280.	53
Figura 35. Gráfico comparativo de densidad de energía y densidad relativa.	54
Figura 36. Análisis de porosidad de las muestras con densidad relativa por encima del 99%.	55
Figura 37. Solidificación de la densidad de grietas en aleaciones AA6061 en secciones transversales análisis XY y XZ.	56
Figura 38. Gráfica de efectos principales por análisis ANOVA.....	58
Figura 39. Parámetros principales de fabricación AA606 por medio de regresión.....	59
Figura 40. Micrografías SEM de las secciones transversales XZ de la aleación AA6061, muestra 12 (a, b).	61
Figura 41. Micrografías SEM de las secciones transversales XZ de la aleación AA6061, muestra 17 (a, b).	61
Figura 42. Micrografía y mapeo de la muestra 12.....	61
Figura 43. Micrografía y mapeo de la muestra 17.....	62
Figura 44. Gráfica de tensión muestra 17 fabricada por la técnica de SLM.	63
Figura 45. Rampa de temperatura del tratamiento térmico T6 para AA6061 realizadas a las muestras 12 y 17.	63
Figura 46. Gráfica de tensión muestras 12 y 17 fabricadas por la técnica SLM y sometidas a tratamiento térmico.	64
Figura 47 Gráfica de "promedios" de durezas Vickers de las muestras con tratamiento térmico y sin tratamiento térmico.....	65
Figura 48. Comparativa dureza Vickers muestras 12 y 17 contra estándar.	65
Figura 49. Curva de Histéresis Muestra 17 con deformación de 0.0035.	66
Figura 50. Grafica Esfuerzo Vs Numero de ciclos para hallar σ_f , A y b de l.	67
Figura 51. Gráfica Deformación plástica Vs Número de ciclos.	68
Figura 52. Curva Elástico - Plástico (Strain-Life) de la muestra 17.	69

Figura 53. *Fractografía del AA6061 cuando es sometido a fatiga*..... 69

Listado De Tablas

Tabla 1. <i>Ventajas y desventajas de la manufactura aditiva [13, 14, 15].</i>	20
Tabla 2. <i>Composición química estandarizada del Al6061 [30].</i>	30
Tabla 3. <i>Propiedades mecánicas del Al6061.</i>	30
Tabla 4. <i>Parámetros seleccionados del estado del arte del AA6061 fabricados por SLM para el diseño experimental [11-24-31-44-47].</i>	40
Tabla 5. <i>Diseño de experimentos por el método de Taguchi.</i>	41
Tabla 6. <i>Resultados obtenidos del análisis de ANOVA.</i>	57
Tabla 7. <i>Parámetros de manufactura con mejor densidad relativa del AA6061.</i>	60
Tabla 8. <i>Datos de la prueba de tensión estática muestra 12 y 17 fabricadas por SLM.</i>	62
Tabla 9. <i>Datos de la prueba de tensión estática muestra 12 y 17, después de ser sometidas a tratamiento térmico.</i>	64
Tabla 10. <i>Datos obtenidos de las pruebas de fatiga para la muestra 12 y 17.</i>	66

Resumen

Los procesos de manufactura aditiva en el siglo XXI han venido presentando una gran evolución en la fabricación de piezas complejas en aleaciones de aluminio, las cuales, anteriormente, no se podían obtener, o resultaban muy costosas por medio de manufactura convencional. Entre estos procesos, se encuentra la fusión selectiva por láser (SLM), la cual apoyó la incursión de la aleación AA6061 en la industria aeronáutica, automotriz y aeroespacial, debido a su baja densidad, lo que permite una reducción considerable del peso de las piezas. Sin embargo, en la actualidad, estas aleaciones presentan una desventaja frente a otro tipo de materiales, puesto que sus propiedades físicas dentro de la técnica de impresión no cumplen con los estándares de servicio requeridos por la industria. Esta investigación se enfoca en analizar los parámetros que influyen directamente en SLM, tales como: potencia del láser, velocidad de impresión, espacio entre capas, patrón de impresión y foco del láser con el fin de proporcionar piezas con el mínimo de defectos tanto internos como superficiales teniendo una densidad relativa cercana a la teórica. La anisotropía y calidad interna del material se caracterizó por medio del principio de Arquímedes y análisis metalográficos. Como resultado principal hubo una optimización de parámetros que superaron la densidad relativa en estudios anteriores al 99% así como una disminución de porosidad y defectos internos.

La implementación de este estudio nos lleva a probar parámetros que proporcionen geometrías finales con propiedades físicas y mecánicas optimizadas para el uso final al que estén destinados, proporcionando piezas finales desarrolladas en AA6061 de alto valor para diferentes industrias.

Summary

Additive manufacturing processes in the 21st century have been showing a great evolution in the manufacture of complex parts in aluminum alloys, which, previously, could not be obtained, or were extremely expensive through conventional manufacturing. Among these processes is selective laser melting (SLM), which supported the incursion of the AA6061 alloy in the aeronautical, automotive, and aerospace industries, due to its low density, which allows a considerable reduction in the weight of the parts. However, at present, these alloys have a disadvantage compared to other types of materials, since their physical properties within the printing technique do not meet the service standards required by the industry. This research focuses on analyzing the parameters that directly influence SLM, such as: laser power, scan speed, hatch spacing, scan pattern and laser focus to provide parts with the minimum of internal and surface defects having a relative density close to the theoretical one. The anisotropy and internal quality of the material was characterized by means of Archimedes principle and metallographic analysis. As a main result there was an optimization of parameters that exceeded the relative density in previous studies at 99% as well as a decrease in porosity and internal defects.

The implementation of this study leads us to test parameters that provide final geometries with physical and mechanical properties optimized for the final use for which they are intended, providing final parts developed in AA6061 of high value for different industries.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Las actuales tendencias de la industria de manufactura se caracterizan por el aumento de la competencia en el mercado global, la complejidad y la personalización de productos debido a las preferencias de los clientes en conjunto con la demanda de esta, a un menor costo y tiempo de producción, según Ghany & Moustafa, 2006 y Sanglas, 2013. Esto ha motivado el desarrollo de nuevas tecnologías para lograr una fabricación rápida, precisa y rentable siguiendo los estándares de las actuales tendencias con productos con un alto valor añadido [1-2]. Una de las tecnologías que permite realizar una fabricación que esté de acuerdo con las tendencias de la industria manufacturera mencionadas, es el proceso de Manufactura Aditiva (AM), nombre que engloba comúnmente las tecnologías que utilizan la fabricación de objetos físicos tridimensionales, directamente desde la información de un diseño en 3D [1, 3].

La principal virtud que tiene este tipo de manufactura es la creación de piezas de geometrías complejas en poco tiempo, pero al igual que tiene sus virtudes también puede llegar a tener desventajas, una de las principales, es que no ofrece seguridad de que para ciertas aplicaciones tenga un óptimo desempeño cuando se someten a diferentes cargas y temperaturas. La manufactura aditiva tiene alrededor de 50 años, pero desde el 2014 se incrementó la producción por medio de esta para nuevos materiales como son los metálicos e incursionar en el mercado automotriz, aeronáutico y aeroespacial.

La fusión selectiva por láser (SLM) es una atractiva tecnología de manufactura aditiva, que fabrica materiales metálicos con estructuras complejas, las cuales contienen gran precisión dimensional y excelentes cualidades mecánicas, eléctricas y químicas, lo que hace que a nivel industrial sea una de las técnicas más utilizadas, posicionándola como la segunda en importancia para la fabricación aditiva de materiales después de los polímeros, debido a que permite un muy bajo desperdicio de material y la implementación de diseños óptimos que no afecta el medioambiente con respecto a la fabricación tradicional [4-5]. Este método funde polvos metálicos mediante el uso de un láser de alta energía, creando una pieza homogénea capa a capa. Los polvos metálicos son ligeros con escasa fluidez y alta reflectividad, esto significa que se requiere una alta potencia del láser para fundirlos y realizar una rápida disipación de calor, lo que permite la oxidación de estos, produciendo piezas porosas [6-7]. Según Zhang J. y Song B., los estudios de investigación de los diferentes aluminios en el proceso de SLM se han desarrollado principalmente en la influencia de los parámetros tecnológicos, en las propiedades mecánicas y microestructurales de las aleaciones Al-Si, excepto para los aluminios serie 2000, Al7075 y Al6061, que presentan solidificación sin equilibrio, lo que dificulta que las piezas fabricadas alcancen las propiedades mecánicas deseadas en comparación a los tradicionales, por lo que los autores recomiendan ampliar el alcance del estudio para estos materiales que tienen buena resistencia a la corrosión y a temperaturas más altas [8].

Un alto nivel de estrés residual y defectos metalúrgicos como poros y grietas ocurren comúnmente en las aleaciones de aluminio fabricadas con SLM, lo que no solo reduce la rugosidad de la superficie y precisión dimensional, sino que también da como resultado malas propiedades mecánicas de los componentes, sin embargo, el estudio del mecanismo de los defectos anteriores todavía está incompleto. Los métodos de mejora para la fabricación de elementos en aluminio con la tecnología SLM se centra en el ajuste de los parámetros del proceso, el precalentamiento del sustrato, la ubicación del láser y el escaneo de capa, los cuales faltan por estudiarse, ya que se han realizado pocos estudios sistemáticos.

La aleación de aluminio 6061 es de gran aplicación a nivel aeronáutico, aeroespacial, naval, automovilístico, etc., debido a su buena relación peso/resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y buena conductividad eléctrica y térmica. En la actualidad, estas aleaciones son fabricadas principalmente por métodos tradicionales, tales como fundición, forja y extrusión [9].

A pesar de que esta aleación es fundida de forma tradicional, todavía presenta muchos problemas en su proceso de producción y uso, tales como la obtención de una microestructura con tamaño de grano grueso propio de las bajas velocidades de enfriamiento y la presencia de defectos metalúrgicos, los cuales disminuyen las propiedades mecánicas del material [10]. En contraste, al fabricar piezas de este material por medio de fusión selectiva por láser (SLM), se podrían obtener piezas más complejas en comparación con el método de fabricación tradicional ya que su alta velocidad de enfriamiento inhibe el crecimiento de grano y la segregación de elementos de aleación que ayudan a mejorar las propiedades mecánicas [11].

A pesar de que la técnica SLM y el material tienen muy buenas características para competir a nivel industrial, en investigaciones recientes como las de Thijsa & Kempenb, 2013 y Zhang & Song, 2019, se ha concluido que hay cuatro obstáculos generales para el desarrollo de la técnica SLM en aleaciones de aluminio: 1) la cantidad de polvos requerida para cada aleación de aluminio es no homogénea y debe estandarizarse al mismo tamaño de grano, 2) los métodos de fabricación tecnológicos de la técnica de SLM no se encuentran bien desarrollados, 3) la dificultad de control de los defectos metalúrgicos y 4) los rendimientos obtenidos del material fabricado no han dado resultados sistemáticos. Dado que la tecnología SLM es de naturaleza interdisciplinaria, es significativo combinar las ventajas de un adecuado diseño mecánico de las piezas con el comportamiento microestructural y mecánico de la aleación con el fin de obtener un conocimiento completo del proceso desde el diseño hasta la fabricación de estructuras completas o componentes funcionales [7-8, 4]. Asimismo, en el proceso de sinterización de fusión selectiva con láser es necesario estudiar condiciones importantes del proceso tales como: aplicación y superposición de las líneas y finalmente la superposición de capas para obtener el objeto físico final. Consecuentemente, surge la necesidad de estudiar los diversos parámetros que

tienen influencia en las propiedades del material y hace necesario establecer, en cada uno de ellos, los valores más adecuados para la obtención de un modelo [3].

Por este motivo, el objetivo general de esta investigación es contribuir a enriquecer el conocimiento del proceso de fabricación de fusión selectiva por láser de piezas metálicas, en la máquina SLM, Selective Laser Melting, de la marca SLM Solutions, Modelo SLM280HL del Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIA, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL. En este proyecto se evaluarán las propiedades mecánicas y microestructurales de la aleación de aluminio 6061 al ser fabricadas por fusión selectiva por láser (SLM) mediante la variación de parámetros tales como: la potencia del láser, velocidad de escaneo, patrón de escaneo, espacio entre capas y el foco del láser. Se realizarán ensayos de densidad por medio de la técnica de Arquímedes para determinar la densidad relativa del material, perfiles de dureza, pruebas de tensión estáticas a 0°, 45° y 90° y fatiga con el fin de evaluar el grado de anisotropía del material. Se analizará mediante la técnica de Difracción de electrones retrodispersados (EBSD) el efecto de las variables operacionales de la técnica SLM sobre las orientaciones cristalográficas de los granos de la fase alfa del aluminio y se correlacionarán con su comportamiento mecánico. La finalidad de esta investigación es de indicar cuál de los valores de fabricación puede ser el adecuado para producción de piezas con propiedades físicas y mecánicas óptimas para la industria automotriz y aeronáutica.

1.1. Hipótesis

El proceso de fabricación por medio de fusión selectiva por láser (SLM) permitirá que el material tenga mínima presencia de defectos internos, buen comportamiento anisotrópico, alta resistencia a la fatiga, alta dureza y una buena correlación de su comportamiento mecánico con la microestructura desarrollada, mediante la variación de los parámetros de fabricación de piezas de aluminio AA6061.

1.2. Objetivo

Modificar parámetros de fabricación como: potencia del láser, velocidad de impresión, espacio entre capas, patrón de impresión y foco del láser por medio de la técnica de fusión selectiva por láser (SLM) de piezas de aluminio AA6061, con el fin de obtener la mínima presencia de defectos de fabricación y así evaluar el comportamiento anisotrópico, dureza y fatiga para la producción de piezas en la industria automotriz y aeronáutica con propiedades físicas y mecánicas óptimas para su utilización.

1.3. Objetivos Específicos

1. Hacer una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el tema, para establecer el estado del arte e identificar la metodología más adecuada para cumplir los objetivos establecidos.
2. Obtener mediante la técnica de fusión selectiva láser (SLM) diferentes piezas metálicas variando parámetros operacionales tales como: potencia del láser, velocidad de impresión, espacio entre capas, patrón de impresión y foco del láser.
3. Caracterizar física y microestructuralmente la aleación de aluminio AA6061 obtenida por la técnica de fusión selectiva láser (SLM) mediante el principio de Arquímedes para determinar la densidad de compactación del material y microestructura del material.
4. Caracterizar mecánicamente la aleación de aluminio AA6061 obtenida por la técnica de fusión selectiva con láser (SLM) mediante ensayos de tracción, dureza y fatiga.
5. Correlacionar los resultados físicos, microestructurales y mecánicos con las variables operacionales del proceso de fusión selectiva por láser (SLM), con el fin de determinar las mejores condiciones de fabricación de piezas de geometrías complejas de aluminio AA6061 con la mínima presencia de defectos.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Manufactura Aditiva

2.1.1 Generalidades

La Manufactura aditiva es un proceso de fabricación que agrupa diferentes tecnologías de última generación, que ayuda a construir elementos de difícil geometría, con componentes diseñados tridimensionalmente por medio de datos obtenidos con la ayuda de un programa CAD, realiza una deposición de material capa por capa, hasta obtener un resultado final que tenga las características físicas seleccionadas por el diseño. Esta técnica de fabricación tiene como principal materia prima materiales como plásticos, metales, y resinas fotosensibles, pero se aplica también con otros como cerámicas, hormigón, cristales etc. En un futuro se espera que se pueda aplicar a la “*bio-impresión*” [13]. En la Figura 1 se muestra el proceso desde la idea hasta la obtención del producto final.

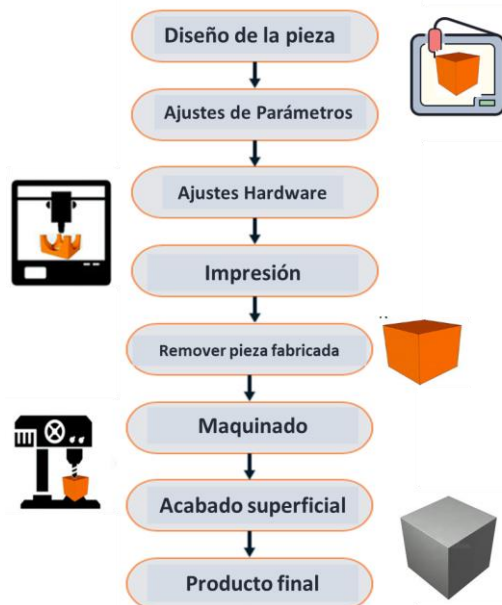


Figura 1. Flujo de trabajo de la manufactura aditiva.

Aunque la manufactura aditiva no sustituye a ninguno de los procesos tradicionales de fabricación, es un proceso en desarrollo de primera mano para crear e innovar en la producción de piezas que no se creían posibles y un complemento para los métodos de manufactura que se vienen utilizando por años. Es por esto que esta nueva técnica de fabricación está captando cada vez más la atención y dedicación en todo el mundo; a

medida que aumenta el índice de fabricación de la manufactura aditiva, se espera que su impacto afecte a empresas a nivel mundial ayudándoles en el progreso de estas [13].

Esta tendencia se ve reflejada en algunos indicadores de crecimiento mundial de la industria de la manufactura aditiva en 3D, mostrados en la Figura 2, donde se puede observar que tiene una tendencia exponencial desde el 2017 hasta el 2020 [1,12].

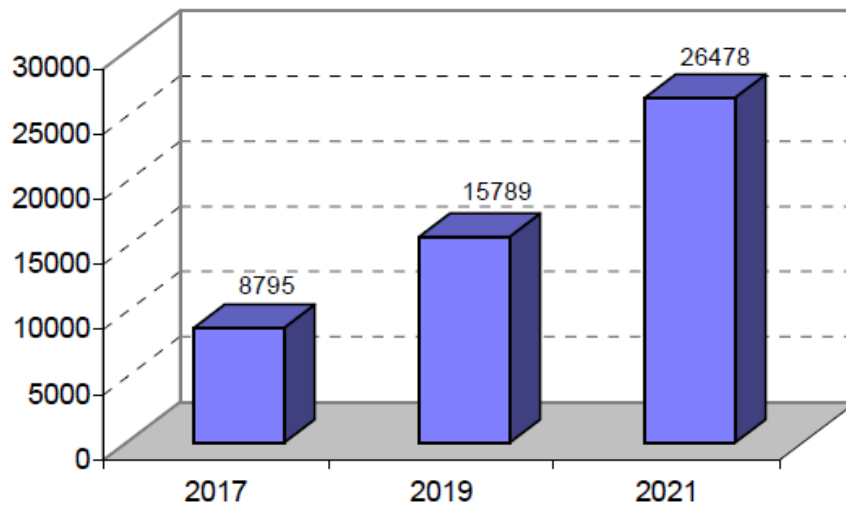


Figura 2. Gráfica de crecimiento mundial de la manufactura aditiva en miles de millones de dólares en venta de producto [14].

Se observa el crecimiento que este tipo de fabricación ha generado a medida que pasa el tiempo, se van detectando ventajas y desventajas de la manufactura aditiva en la industria, haciendo que el proceso de fabricación este en la mira de los investigadores y por lo anterior, los investigadores del área de manufactura y materiales se encuentran resolviendo las desventajas que se han presentado; a continuación, se presentan algunas de las principales ventajas y desventajas de este proceso en la Tabla 1.

MANUFACTURA ADITIVA	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Aceptación en el sector industrial y rápida adaptación a las exigencias de un mercado en continua transformación.	Tamaño de la pieza condicionada al tipo de maquina y tipo de manufactura aditiva utilizada.
Personalización del producto con total flexibilidad de innovación y desarrollo.	Series de producción cortas, debido a que no se puede producir grandes volúmenes, todavía.
Producción que minimiza el desperdicio de material, debido a que se adiciona material y no se sustrae	Tiempo de fabricación es mucho más lento que una fundición y el costo en estos momentos es elevado.
Baja probabilidad de recurrir a tratamientos posteriores como el mecanizado	La selección de materiales no es amplia debido al tipo del proceso es restringido el tipo de aleaciones para utilizar.
Las piezas se obtienen directamente del modelo CAD en 3D, por lo que no es necesario tener otro tipo de herramienta o cambiarla en el proceso de fabricación	Propiedades del material: las piezas fabricadas con la tecnología aditiva tienden a mostrar anisotropía en el eje Z (dirección de la construcción).
Posibilidades de diseño complejas, personalizadas, funcionales y ligeras.	Variabilidad del proceso: las propiedades del producto final dependen de un gran número de parámetros.
Piezas acabadas, con baja porosidad residual.	Falta de normalización específica.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la manufactura aditiva [13, 14, 15].

Aunque existe la terminología coloquial para la manufactura aditiva, el término "impresión 3D" es el más utilizado, para diversos procesos individuales. Sin embargo, en 2010, la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), emitió la norma "ASTM F42– Additive Manufacturing", donde establece la clasificación de este tipo de fabricación acorde a la materia prima (líquido, polvo y sólido), lo cual permite homogeneizar un lenguaje técnico para la investigación e industria y senta las bases para futuros desarrollos tecnológicos. En la Figura 3, se muestra la clasificación de la MA de acuerdo con la ASTM [14].

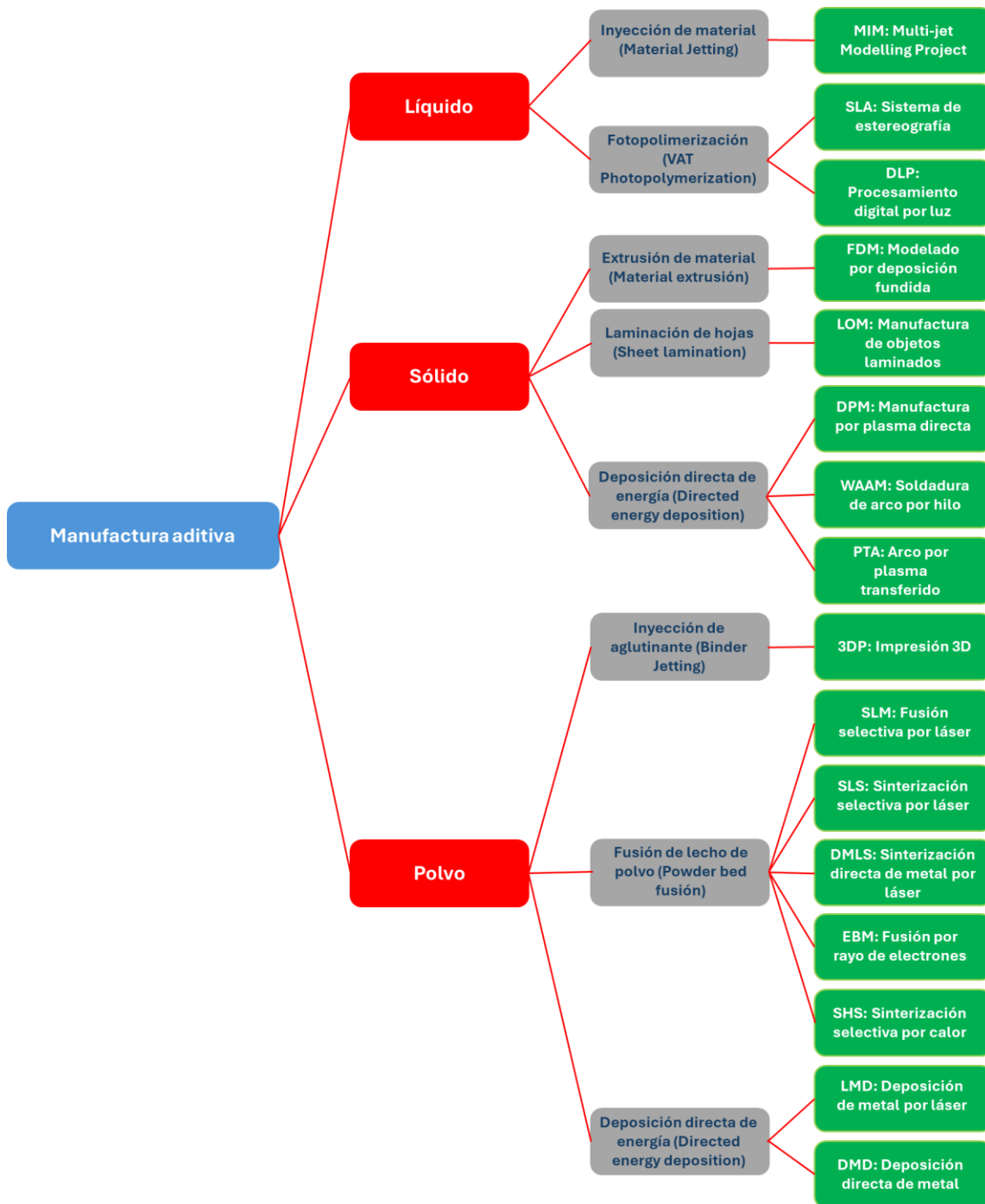


Figura 3. Clasificación de la manufactura aditiva según su materia prima [16].

2.1.2 Fusión Selectiva Láser (SLM)

En la búsqueda de mejorar día a día los requerimientos de la industria y sabiendo que la impresión 3D de polímeros se encuentra consolidada dentro de la manufactura aditiva y con la necesidad de innovar en la impresión de partes metálicas por medio de polvo, de acuerdo con la investigación de Herzog et al. (2016) los métodos más populares para procesar metales a través de la manufactura aditiva son los que utilizan energía como un parámetro de entrada, este tipo de energía puede ser por medio de un haz de electrones o de un láser [12,17].

Durante el proceso, el láser o haz de electrones funde el metal de la capa, el cual suele ser polvo, que posteriormente se va solidificando y va generando capa por capa la geometría completa hasta la obtención de una pieza final. Dentro de las técnicas estudiadas para la impresión de elementos metálicos se encuentran técnicas como la Fusión Selectiva por Láser (SLM), Fusión por Haz de Electrones (EBM), y Deposición de Metal Directa (DMD). Cada una tiene diferentes condiciones de trabajo con las cuales se puede trabajar, algunas de estas son similares, pero dependen de la aplicación y propiedades que se requieran. Por lo anterior, este trabajo se enfoca exclusivamente en la Fusión selectiva por láser, debido a que, para el AA6061, material elegido para esta investigación, no se han establecido a nivel mundial los parámetros óptimos, y además es una de las técnicas de manufactura más común y las más económicas que hay dentro del mercado actual [18,19].

Como se mencionó anteriormente, la SLM es una de las nuevas tecnologías de la fabricación aditiva que inicio a finales de los años 80 y principios de los 90 [6]. Este proceso de fabricación aditiva comienza con la creación de un modelo tridimensional (3D) a través del uso de software de diseño asistido por computadora (CAD), con una alta precisión (± 0.1 mm en 25 mm) y una alta calidad en el acabado superficial (5-15 μm) [7, 20-21]. Como tecnología de fabricación de aditivos a base de polvo, la SLM puede crear partes específicas con geometrías complejas; debido a la microestructura refinada generada sobre solidificación rápida sin equilibrio, los componentes de SLM pueden mejorar propiedades mecánicas de piezas bimetálicas sintetizadas, iguales o similares a las piezas fabricadas tradicionalmente, por la reducción de procesos de mecanizados o tratamientos térmicos posteriores a la fabricación [8, 22-23].

A continuación, en la Figura 4 se puede observar esquemáticamente el proceso SLM; se aplica primero una capa de polvo en la plataforma de trabajo con un rodillo que va arrastrando los polvos al área de trabajo donde se va a crear la pieza; posteriormente, un haz de láser funde selectivamente secciones de la capa de polvo, acorde a lo ya diseñado vía CAD. Posteriormente, la plataforma desciende el espesor de 20 a 100 μm (según se haya programado) y se aplica una nueva capa de polvo. Esta operación de fusión con haz de láser se repite sucesivamente, hasta obtener la geometría deseada [24].

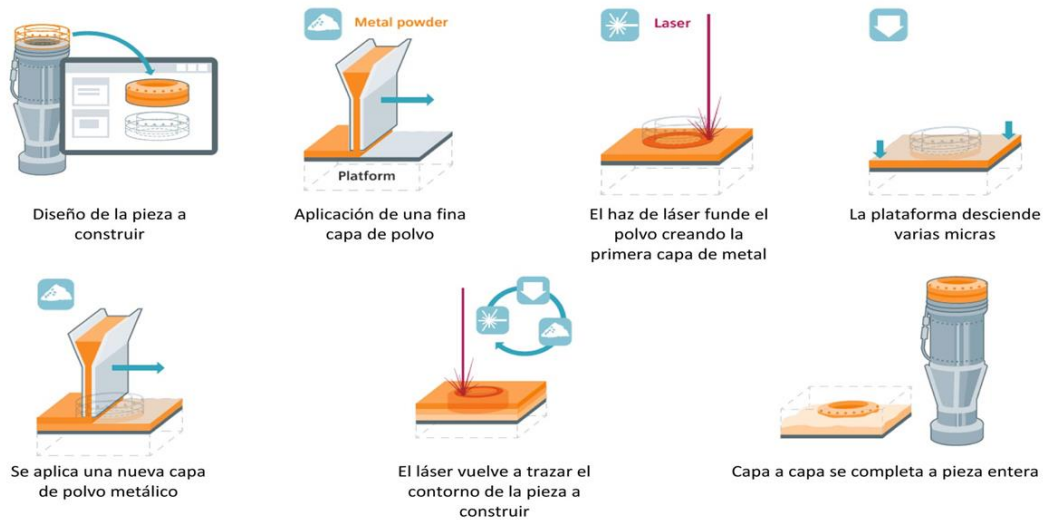


Figura 4. Representación esquemática del proceso de SLM [25].

2.1.3 Parámetros Que Influyen En La Fusión Selectiva Por Láser (SLM)

El proceso de fabricación no es complejo, sin embargo, la dificultad radica en encontrar cómo optimizar los valores de cada uno de los parámetros y obtener las propiedades microestructurales y mecánicas requeridas en función de la aplicación final. Los principales parámetros que pueden variar las propiedades de las piezas son brevemente presentados en la Figura 5.

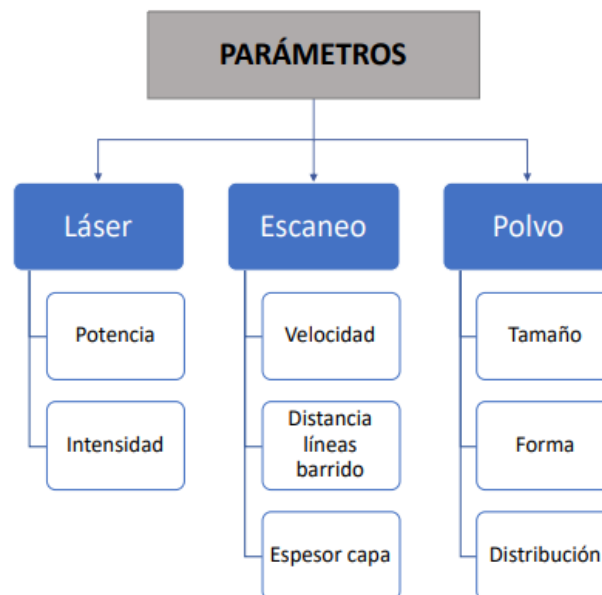


Figura 5. Esquema de los parámetros del proceso que modifican las propiedades finales de las piezas [11].

a) Tamaño y morfología de las partículas de polvo.

El tamaño de partícula tiene una influencia importante en la deposición de la capa de polvo y el comportamiento de fusión. Cuanta más pequeña es ésta, más rápida y efectiva es la fusión de la superficie deseada. Respecto a la morfología de las partículas, una forma más esférica y una superficie suave, con un menor número de partículas satélite, dan como resultado una mejor fluidez y una deposición de la capa de polvo más homogénea [18].

b) Intensidad del haz láser.

Al dividir la potencia aplicada entre la superficie del punto de aplicación del haz láser se obtiene intensidad y se expresa en W/cm^2 . El área de concentración del haz se idealiza en forma de círculo. Cuanto mayor sea el área, mayor cantidad de polvo recibirá la energía del láser. El tamaño del radio puede modificarse mediante el desplazamiento del plano de enfoque variando así la distribución de energía. Como puede verse en la Figura 6, la energía no se distribuye uniformemente en toda el área, la parte central recibe la mayor parte de la energía, disminuyendo conforme se aleja del punto medio [19].

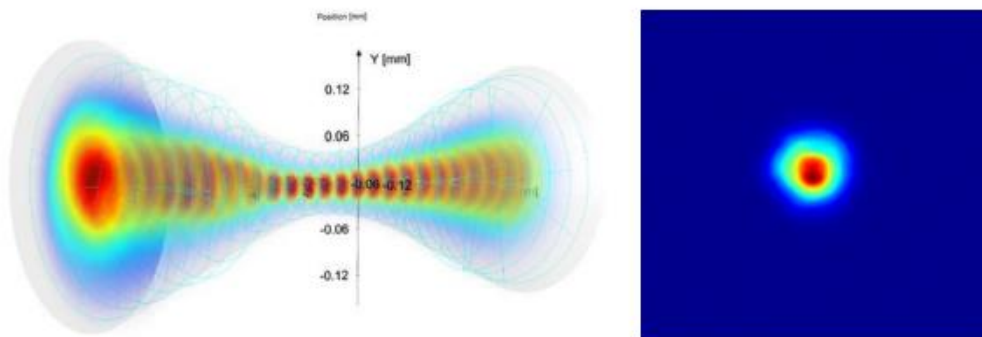


Figura 6. Medida de la intensidad del rayo láser según el radio [19].

c) Potencia del Láser (P).

La potencia del láser es la principal fuente de energía para la fusión del polvo. Cuanto mayor sea la potencia, más energía se transferirá al polvo y mayor temperatura se alcanzará. Si no hay suficiente potencia, el polvo no llegará a fundirse completamente y la pieza puede tener poros e imperfecciones, reduciendo su densidad relativa. Para los materiales metálicos se utiliza un láser Nd-YAG, cuya radiación de este diodo ayuda a una mayor fusión. Dependiendo del material utilizado necesitará una potencia promedio que llegue al punto de fusión del material metálico. Si durante el proceso, se aplica demasiada energía se puede evaporar el polvo y producir imperfecciones. Generalmente, la potencia máxima de las máquinas de SLM no supera 1 kW. Además, la potencia del láser está directamente relacionada con la velocidad de escaneo [20].

d) Velocidad de Escaneo (V).

Es la velocidad a la que se mueve el haz, medida en mm/s. Cabe mencionar que, un valor máximo de velocidad implica un menor tiempo de impresión. Sin embargo, una velocidad demasiado alta provocará un menor tiempo de permanencia en el mismo punto de la capa y por ende una disminución de la energía transferida; causando una fusión incompleta y una rápida solidificación, lo que hace que los huecos no puedan llenarse completamente de material fundido y aparezcan poros e imperfecciones. Por otro lado, cuanto más baja sea la velocidad, más tiempo permanecerá el láser en el mismo punto, existiendo la posibilidad de aplicar un valor demasiado alto de energía que puede evaporar el polvo y provocar imperfecciones a causa de la aparición de gases que tratan de escapar del metal. Por estas razones, es muy importante tener en cuenta este parámetro de procesado, normalmente comprendido entre los 1,000 y 2,500 mm/s, dependiendo de la máquina y el material de impresión [20,21].

e) Distancia Entre Líneas De Barrido.

Es la distancia entre los centros de dos pistas adyacentes del paso del láser por la capa de polvo. El haz láser únicamente puede moverse en línea recta. Al golpear la superficie, su forma se simplifica en un círculo donde la parte central aplica la energía máxima y, conforme la zona se aleja del punto de aplicación, la energía va disminuyendo, como se ha comentado anteriormente. Esto significa que, las zonas más alejadas del punto central de aplicación de energía no se funden correctamente, por lo que las pistas deben estar lo suficientemente cerca unas de otras, requiriendo siempre una cierta superposición entre capas debido a que, si éstas están demasiado alejadas entre sí, el polvo entre ellas no se fundirá correctamente. Por este motivo, es necesario optimizar este parámetro y de esta manera poder tener la mayor distancia entre líneas posible para poder tener más productividad, pero asegurando una correcta fusión del polvo (Figura 7). Aunque la construcción con mayor espacio entre capas permite una fabricación más rápida, debe tenerse en cuenta que en ese caso se requieren espesores de capa más pequeños para garantizar la superposición entre capas, porque cuando aumenta el espaciado de la trama, la pieza se mantiene unida principalmente a través de la unión entre capas y la superposición entre ellas, debe disminuir para garantizar esta unión. Por lo tanto, aunque se rebaje el tiempo separando las líneas de barrido, se deberán agregar más capas y, por lo tanto, más tiempo [22].

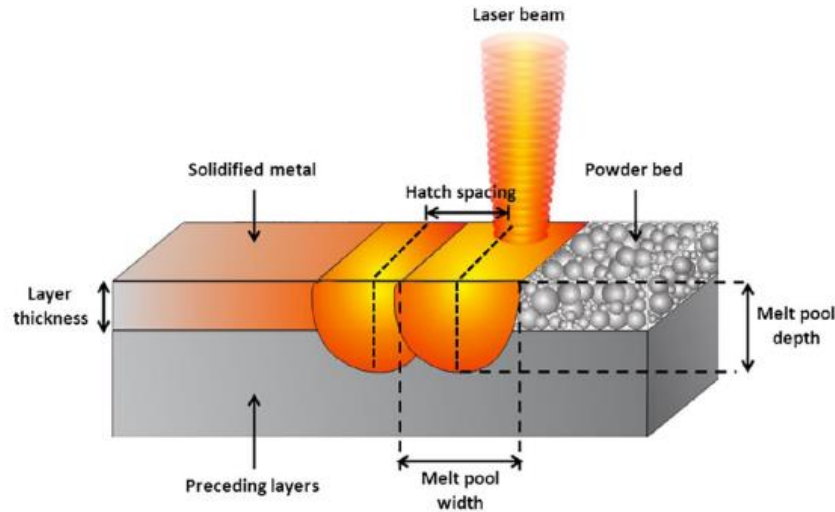


Figura 7. Representación del barrido del láser en la capa de polvo [22].

f) Espesor De Capa.

Este parámetro lo determina la altura (h) que tiene cada capa de polvo aplicada por la impresora 3D. Cuanto mayor sea este valor, menos capas se necesitarán para completar la geometría deseada y, por lo tanto, menor tiempo de fabricación. En cambio, un menor espesor de capa (h) proporciona un mejor acabado superficial y una mayor resolución de la pieza [22].

g) Patrón de Escaneo.

El último parámetro es el patrón de escaneo o estrategia de escaneo utilizada. En otras palabras, la trayectoria del láser seguida en cada capa para fabricar la pieza. Hace que los posibles recorridos a seguir en la creación de cada capa sean limitados tal como se muestra en la Figura 8, en esta se aprecian algunas de las diferentes trayectorias que pueden realizarse mediante esta tecnología. Como podemos ver en la Figura 8a la trayectoria más simple es la que el haz láser sigue un recorrido unidireccional continuo en cada capa, también se puede observar cuando el haz de láser sigue una trayectoria bidireccional, rotando 90° en cada capa, ayuda a una disminución de poros o falta de fusión. En la Figura 8b, se muestra la técnica llamada “escaneo por islas”, la cual ayuda dar un mejor acabado. Finalmente, se observa un cambio de dirección de escaneo en capas consecutivas. En este sentido, cabe mencionar que el patrón de escaneo puede afectar a la porosidad y a la textura de la pieza [24].

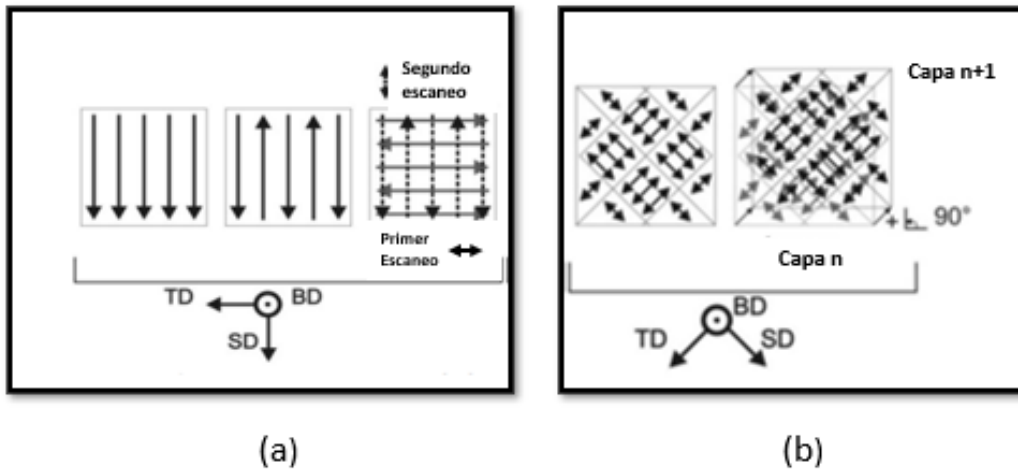


Figura 8. Estrategias de escaneo; (a) trayectoria simple, (b) trayectoria llamada “escaneo por islas” (TD = dirección transversal; SD = dirección de escaneo; BD = dirección longitudinal) [24].

2.2 Aleaciones De Aluminio

2.2.1 Generalidades

Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar en los materiales que se utilizan con fines estructurales. Tienen una densidad de sólo 2.7 g/cm^3 , es mucho más ligero que el acero, por lo que permite la construcción de estructuras ligeras y resistentes, particularmente ventajosas en vehículos espaciales, aviones, y en todo tipo de vehículos terrestres y marítimos.

Las aleaciones de aluminio se dividen entre forjadas y fundidas, que hasta ahora han tenido muy buen comportamiento en servicio, pero cuando se requiere una geometría compleja o simplemente está fuera del mercado, se recurre a la manufactura aditiva. Muchas de las piezas que se han construido con las aleaciones de aluminio a través de procesos de manufactura aditiva de metal se han detectado con mejores propiedades mecánicas que las piezas moldeadas en arena, pero no suelen ser tan buenas como los materiales forjados. Una de las razones por las cuales no ha podido mejorar la fabricación convencional es por la gran cantidad de soldaduras superpuestas. En la mayoría de los casos, los ingenieros pueden entender que el metal de soldadura de estas aleaciones de aluminio tiene microestructura y propiedades mecánicas diferentes a los que se fabrican comúnmente y que presentan zonas afectadas térmicamente durante el proceso de soldadura [26].

Un gran número de otras composiciones forjadas dependen del endurecimiento por deformación, usualmente en combinación con varios procedimientos de recocido. Algunas aleaciones fundidas no son tratables térmicamente y son usadas sólo en la condición de colada, o en condiciones modificadas térmicamente no relacionadas con los efectos de precipitación o del tratamiento en solución [27]. La mayor parte del sector de la manufactura aditiva inicialmente optó por trabajar con una sola aleación específica, que es la aleación de fundición a presión AlSi₁₀Mg debido que presenta una resistencia razonablemente alta después de un tratamiento térmico apropiado. Aunque este hecho también ha sido motivo de gran controversia, debido a que la idea de la manufactura aditiva es que el material tenga las mismas propiedades mecánicas sin un proceso posterior [28].

Nuevas aleaciones están surgiendo todo el tiempo y la tasa de adopción de metales para la manufactura aditiva está aumentando, porque se encuentra en constante desarrollo y los sistemas están mejorando todo el tiempo. Por lo tanto, la consideración más importante al tratar de trabajar con cualquiera de estas aleaciones, o nuevos polvos de aleación, es tener la flexibilidad para desarrollar parámetros de proceso con un sistema completamente abierto para controlar el sistema de ajustes y establecer a cualquier valor que el usuario desee y a la par mejorar las propiedades físicas y mecánicas con respecto a la manufactura convencional [26-28].

2.2.2 Clasificación De Las Aleaciones De Aluminio

Las aleaciones de aluminio se clasifican en grupos, para mayor simplicidad, acorde a lo que determinó la Asociación Estadounidense del Aluminio (The Aluminum Association) en 1954. Se emplea una numeración de cuatro dígitos, como se puede observar en la Figura 9. El primero es un número correlativo que indica el grupo de aleación, haciendo referencia al principal elemento aleante de la serie, mientras que el segundo indica cualquier cambio de la aleación original o límites de impureza; el cero se utiliza para la aleación original y los enteros del 1 al 9 indican las modificaciones de esta. Los dos últimos dígitos para la serie 1xxx son decimales en el porcentaje de aluminio, por encima del porcentaje mínimo (99%). En las series restantes los últimos dos dígitos identifican las diferentes aleaciones [28].

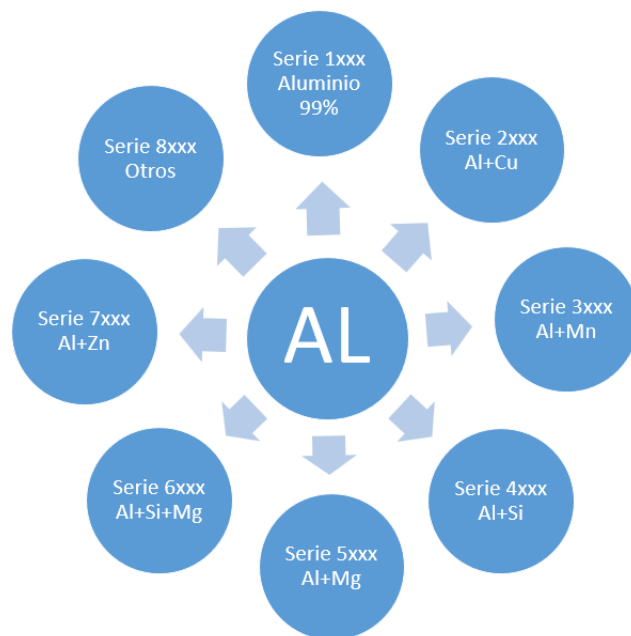


Figura 9. Clasificación de las aleaciones de aluminio según sus composiciones químicas [29].

Uno o más dígitos que siguen a la letra indican subdivisiones de los tratamientos térmicos, cuando influyen significativamente en las características de la aleación. Por ejemplo, a las aleaciones suministradas en calidad de “como fabricadas” o en condición de “recocido” se le designan con los sufijos F y O, respectivamente. La letra W designa a la condición “solubilizada”. Aleaciones entregadas en la condición de “endurecidas por deformación” son designadas con la letra H, y con la letra T es la condición “tratada térmicamente”. Los dígitos siguientes a la letra H representan el grado de endurecimiento por deformación y los dígitos siguientes de T al tipo de tratamiento de envejecimiento [28,29].

2.2.3 Aleación AA6061

La aleación de aluminio 6061 es una aleación que contiene aleantes como Mg y Si, es considerada una aleación dúctil y ligera, tiene buena resistencia y excelente acabado. Posee excelente resistencia a la corrosión, tiene buenas propiedades de tensión, parecidas a las del acero y además facilidad de soldadura. Tiene un tratamiento térmico por solución y un envejecido artificial para aumentar sus propiedades mecánicas.

La fabricación aditiva de metales usa polvos de aleación que se aplican en capas delgadas y se calientan con un láser u otra fuente de calor directa para fundir y solidificar las capas. Normalmente, si se utilizan aleaciones de aluminio no soldables de alta resistencia como el Al6061 [31].

Su composición química es estandarizada por diversas especificaciones de fabricación, para obtener una mayor eficiencia del material dependiendo el requerimiento, en la Tabla 2 se muestra la composición del Al6061 y la Tabla 3 las propiedades más importantes.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros
Rem.	0.40- 0.80	0.7	0.15- 0.40	0.15	0.8- 1.2	0.04- 0.35	0.25	0.15	0.15

Tabla 2. Composición química estandarizada del Al6061 [30].

Propiedades mecánicas Al6061	
Densidad (g/cm^3)	2.70
Coefficiente de expansión Térmica ($\mu/\text{m. } ^\circ\text{C}$)	23.6
Rango de fusión ($^\circ\text{C}$)	580-680
Módulo de elasticidad (GPa)	69
Conductividad Térmica a 25 $^\circ\text{C}$ (W/m. } ^\circ\text{C})	180
Soldabilidad (Electronbeam)	A

Tabla 3. Propiedades mecánicas del Al6061.

Los usos más frecuentes par el AA6061 son los componentes de chapa conformada y/o soldada, piezas mecánicas, moldes en la industria del plástico, camiones, torres, canoas, vagones, muebles, cañerías, estructuras alares y fuselajes de aeronaves y otras aplicaciones estructurales donde se requiera soldabilidad y resistencia a la corrosión y mecánica.

2.3 Propiedades Físicas

2.3.1 Densidad Relativa

La densidad relativa es la relación adimensional entre la densidad de una sustancia y una densidad de referencia, de modo que la fórmula para calcular la densidad relativa de una sustancia es la que presenta la ecuación 1: [31]

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad de la sustancia a estudiar y ρ_0 es la densidad que se determinó como referencia.

El principio de Arquímedes establece que la fuerza de flotación sobre un objeto sumergido en un fluido (líquido o gas) es igual al peso del fluido que el objeto ha desplazado. Implica que un objeto se hundirá en un fluido si su densidad media es mayor que la del fluido (Figura 10).

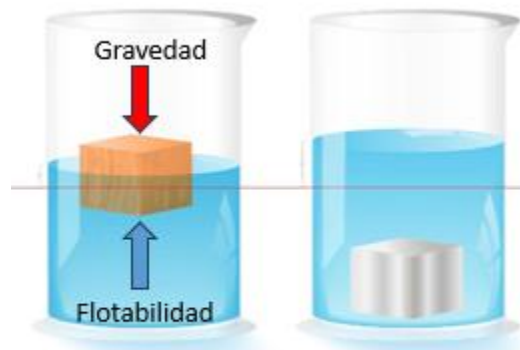


Figura 10. Método de Arquímedes para hallar la densidad relativa [32].

2.3.2 Microscopia Electrónica De Barrido (MEB)

Un microscopio electrónico de barrido (MEB) es un microscopio electrónico que genera imágenes haciendo un barrido de la superficie de una muestra con un haz concentrado de electrones. Los electrones interactúan con los átomos de la muestra, generando señales que transmiten información sobre la topografía y la composición de la superficie de la muestra. El haz de electrones se escanea en un patrón de barrido en x-y y la posición del haz se combina con la intensidad de la señal detectada para crear una imagen como se ve en la Figura 11.

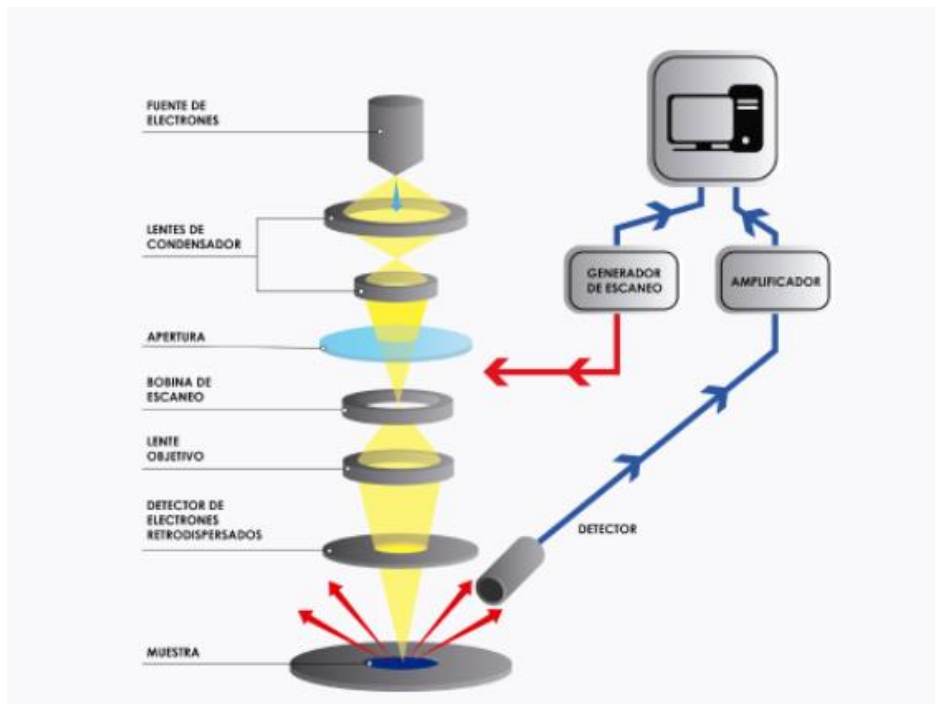


Figura 11. Funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido.

Este microscopio forma imágenes mediante un haz de electrones que se mueve en un patrón x-y a través de una muestra conductora, que libera varias señales de datos que contienen información estructural y de composición. Debido a que se utilizan electrones como fuente de radiación en lugar de fotones de luz, se mejora la resolución. Simultáneamente, debido a que la muestra se irradia en un modo de secuencia temporal, se logra una gran profundidad de campo y las imágenes aparecen en tres dimensiones. Además, una amplia gama de aumentos (10 a 30,000X) facilita la correlación de imágenes macro y microscópicas.

El microscopio electrónico de barrido también tiene capacidades analíticas. Entre las señales de datos liberadas durante el examen se encuentra la espectroscopia de energía dispersa de rayos X (EDAX), que caracteriza la composición elemental de la muestra. Cuando se combinan la información estructural y la espectroscopia, surge una descripción única de la muestra. Los desarrollos más recientes en microscopía electrónica de barrido (SEM) incluyen imágenes de ondas térmicas, que se utilizan para detectar defectos del subsuelo. Los dispositivos también están disponibles para estudios de fractura in situ y tienen aplicación en el estudio cinemático de la deformación.

2.3.3 Difracción De Electrones Retrodispersados (EBSD)

La difracción por retrodispersión de electrones (EBSD) es una técnica automatizada cuantitativa que permite analizar la estructura cristalina y medir con gran rapidez la orientación de los cristales de una muestra. Esta técnica permite obtener información detallada sobre la estructura cristalina de los materiales y cómo esta afecta a sus propiedades físicas y mecánicas, analiza la calidad y la homogeneidad de los materiales. En la Figura 12 se puede observar la visión general del proceso de indexación de la técnica EBSD la cual muestra el patrón de orientación de los cristales.

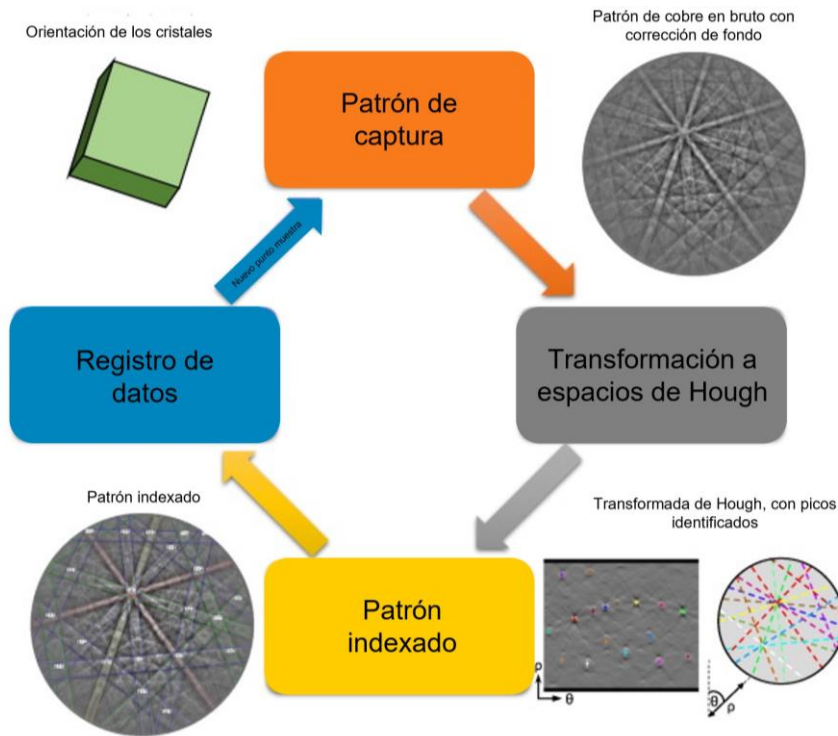


Figura 12. Proceso de indexación por medio de la técnica EBSD.

La técnica EBSD se basa en el análisis de patrones de difracción conocidos como líneas, bandas o patrones de Kikuchi, las cuales están directamente relacionadas con la estructura reticular de la red cristalina en la región del material analizado; durante los barridos, los electrones del haz impactan contra los átomos que componen la muestra y algunos son retrodispersados. Estos patrones o bandas de Kikuchi están relacionados con la fase y la orientación del área de la muestra estudiada [64].

2.4 Evolución del AA6061 en SLM

Durante esta investigación se realizó un análisis bibliográfico de cómo se fue desarrollando el AA6061 a través del tiempo con investigaciones que ayudaron a aterrizar ciertos criterios y parámetros que permitieron obtener los presentes resultados.

Los procesos de fabricación aditiva, especialmente el de fusión selectiva por láser, ayuda a mejorar procesos de fabricación de los metales fabricando piezas capa por capa a partir de datos tridimensionales (3D). La industria se beneficia ahora de este tipo de manufactura para la fabricación de estructuras geoméricamente complejas y de este modo acortar las cadenas de suministro y los plazos de entrega, debido a la facilidad de fabricación que brinda esta técnica [15]. Las aleaciones de aluminio son consideradas un reto a la hora de procesarlas mediante SLM. Los polvos de Al son un poco más ligeros comparados con otros materiales metálicos, tienen una alta reflectividad, alta conductividad térmica y baja

absorción láser en el rango de longitudes de onda (1,06 μm) de los láseres de fibra continua utilizados convencionalmente en SLM como lo comentan Alboukhair & Simonelli [9,31].

Se iniciaron investigaciones de procesamiento de las aleaciones de aluminio por medio de SLM resultando prometedoras las aleaciones $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ y el AlSi_{12} [65], siendo estos los materiales a los cuales se les ha prestado mucha más atención, debido a su buena colabilidad, junto con la baja contracción de su fase eutéctica Al-Si. Aunque las aleaciones Al-Si son beneficiosas, su resistencia a la tracción es promedio y su ductilidad es baja ($\sim 4\%$) [33].

Las aleaciones de Al ampliamente utilizadas en las industrias aeroespacial y automotriz, fabricadas por medio tradicional incluyen las series 2xxx, 5xxx, 6xxx y 7xxx de alta resistencia, ofrecen una mayor ductilidad y resistencia a la tensión. Sin embargo, estas aleaciones siguen luchando por encontrar su camino para ser declaradas procesables con éxito mediante SLM. Debido a las elevadas velocidades de enfriamiento asociadas al proceso, estas aleaciones tienden a microfisurarse durante el procesamiento por SLM, lo que da como resultado piezas con una integridad estructural deficiente [8, 66]. Específicamente el AA6061 que tenía dificultades que estaban relacionadas con la formación de finas capas de óxido que favorecían la porosidad [31] y el agrietamiento por solidificación. Debido a su alta reflectividad y conductividad térmica, estas aleaciones requieren una alta potencia láser para ampliar la ventana de procesamiento [35]. Se afirma que la potencia del láser y la velocidad de barrido son los parámetros más influyentes [8]. El uso de láseres de alta potencia (hasta 1 kW) se ha demostrado que aumenta el rango de velocidad utilizable [31]. La densidad relativa de las piezas está inversamente relacionada con la velocidad de escaneado.

Martin et al. [68] informaron de la formación de grietas en el AA6061 paralelas a la dirección de construcción, una observación similar a la de Kaufmann et al. [69] para el AA7075 (ver Figura 13). Las grietas en estas dos aleaciones aumentaron con la velocidad de barrido, lo que se pensó que se debía a la presencia de Cu y Mg ampliando el rango de solidificación del material, debido a que los granos columnares crecen en la dirección del gradiente térmico, dejando líquido interdendrítico en las interfases, lo que, unido a la contracción, conduce a la formación de grietas (ver Figura 14). Además, Kaufmann et al. indican que la formación de esfuerzos residuales que superan el límite elástico del material durante la solidificación favorece la progresión de las grietas a lo largo de esa dirección.

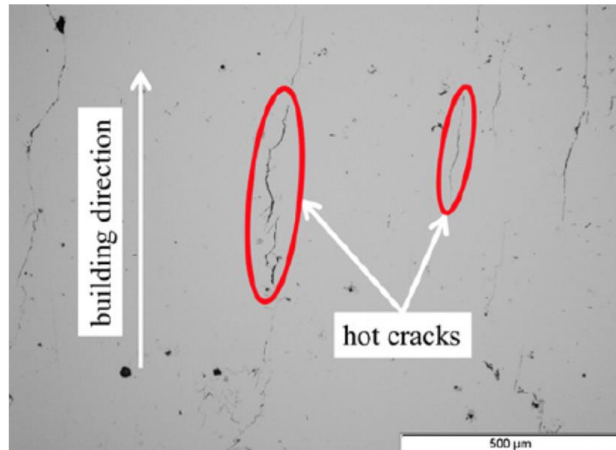


Figura 13. Fisuras en caliente formadas en la SLM AA-7075 a lo largo de la dirección de fabricación [69].



Figura 14. Crecimiento dendrítico se sustituyen por grietas en la microestructura equiaxada (Kaufmann et al) [69].

El estudio de Maamoun et al. [51] permitió definir los límites de algunos de los parámetros, debido a que se realizó el proceso de fabricación con 3 variables de modificación importantes como la velocidad de escaneo, potencia del láser y espacio entre capas, indicando que para el AA6061 se generaron pocas microfisuras que se obtuvieron con una densidad de energía de $52,6 \text{ J/mm}^3$ y una velocidad de barrido de 1000 mm/s . En la Figura 15 se puede observar la dirección de las microfisuras y, de igual manera, precipitación de partículas de Si a lo largo del límite de grano [51, 65].

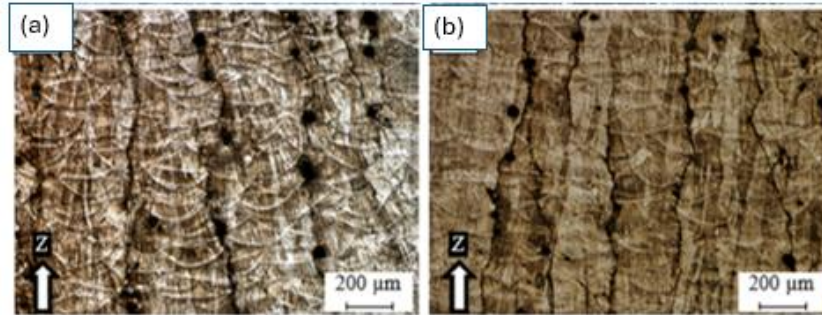


Figura 15. Microestructura de las muestras de Al6061 procesadas con diferentes parámetros de proceso SLM (a) 300 W, 100 0mm/s, 52.6% en la dirección Z; (b) 300 W, 1000 mm/s, 52.6% en el plano XY [51].

Zhang y Song [11] fabricaron muestras con AA6061 adicionando otro tipo de parámetros a partir de una serie de experimentos preliminares, los parámetros de la SLM son: potencia del láser de 240-360 W con un intervalo de 40 W, velocidad de barrido de 450-900 mm/s con un intervalo de 150 mm/s, espesor de capa de 0.05 mm, espacio entre capas de 0.17 mm y un patrón de escaneo del 90°, disminuyendo la porosidad y aumentando la densidad relativa a 98%.

En la Figura 16 se muestran micrografías del AA6061 y el cambio en la porosidad a medida que aumenta velocidad y con poca potencia, también se puede observar las dos series de parámetro que en los cuales hay menor porosidad las cuales están subrayadas con rojo [8, 42].

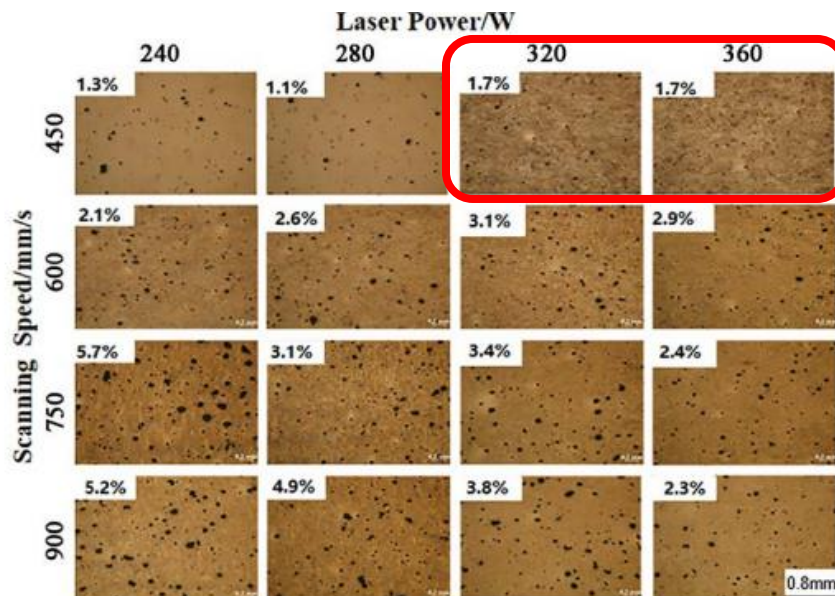


Figura 16. Imagen de microscopio óptico de las superficies pulidas [42].

En el trabajo de Ley-Bun-Leal et al. [47] para la selección de los parámetros y su límite inferior, se realizaron tres diseños de experimentos factoriales completos para lograr la optimización del proceso de SLM en la aleación AA6061 por medio de ANOVA y así determinar los factores más influyentes en el proceso. En comparación con el trabajo de Zhang y Song [11], se fijó un valor de espesor de capa de 70 μm , mientras que los valores de potencia y velocidad de escaneo varían y generan una densidad máxima obtenida superior al 97% como se muestra en la Figura 17, correspondiente a las muestras 3-1 y 3-5. Las dos muestras coinciden en tener parámetros de P y V de 220 W y 300 mm/s respectivamente [47].

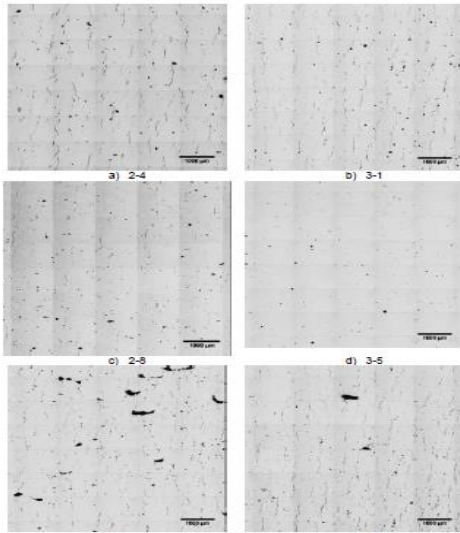


Figura 21. Microscopía óptica de las muestras en Al6061, a) 2-4, b) 3-1, c) 2-8, d) 3-5, e) 3-3, f) 3-7.

Tabla 17. Resultados experimentales de densidad relativa en porcentaje para el DoE 3 en Al6061.

	P (W)	V (mm/s)	HS (mm)	As-build	Interna
3-1	220	300	0.05	94.39	97.55
3-2	300	300	0.05	91.40	94.71
3-3	220	500	0.05	94.35	97.03
3-4	300	500	0.05	90.49	92.75
3-5	220	300	0.1	94.89	97.22
3-6	300	300	0.1	88.64	91.79
3-7	220	500	0.1	93.99	97.10
3-8	300	500	0.1	93.16	96.07
3-9	260	400	0.075	93.18	96.79

Figura 17. Parámetros con valor alto de densidad relativa para el Al6061 [47].

Un factor importante y que no se tuvo en cuenta en estudios anteriores es el espacio entre capas y el patrón de escaneo, a pesar de que no está dentro de los parámetros de la densidad de energía, estas variables influyen en el acabado del material fabricado por SLM, Wang et al. [24] llegan a la conclusión que para garantizar la solidez de una muestra fabricada por SLM y eliminar la porosidad entre los espacios de las capas consecutivas, cada espacio entre capas tiene un traslape, conocido como solapamiento entre capas (Δx), con su espacio anterior como se muestra en la Figura 18. El grado de traslape del espacio entre capas también depende del material que se vaya a procesar y de los parámetros del láser. Por lo tanto, la distancia de seguimiento efectiva es la diferencia entre la distancia de sombreado y el ($a - \Delta x$). En la mayoría de los procesos SLM, se mantiene un traslape de $\sim 20\%$ o más para garantizar una mejor calidad de las piezas SLM [24]. Para completar una pieza en 3D, el proceso de SLM implica varios espacios dentro de cada capa y varias capas dentro de cada pieza (Figura 18) [24,70].

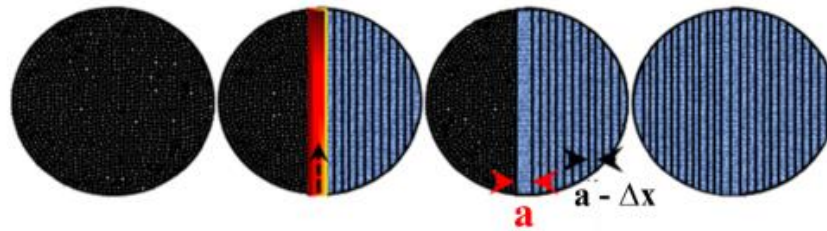


Figura 18. Esquema que muestra la distancia entre capas de escaneo y los traslapes durante el proceso de fusión selectiva por láser [24].

Esta revisión reúne los avances más recientes de la fabricación del AA6061 mediante el proceso de SLM. Las ventajas y limitaciones de este proceso se han abordado con los diferentes parámetros asociados a las interacciones entre el láser y el aluminio. Se han estudiado el efecto de los parámetros del láser, como la potencia, la densidad de energía, la longitud de onda, el patrón de escaneo, la distancia entre capas y las características del polvo, como la fluidez, la composición, el tamaño y distribución de partícula y morfología, sobre los probables defectos y el nivel de densificación de los materiales del AA6061 [11,24].

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología llevada a cabo en este trabajo de investigación está encaminada a determinar las mejores variables de fabricación de piezas de la aleación de aluminio AA6061 por medio de la técnica de fusión selectiva láser (SLM), con mínima presencia de defectos de fabricación y así evaluar el comportamiento físico, mecánico y microestructural de la aleación para su aplicación industrial. En la Figura 19, se puede observar el diseño metodológico resumido.

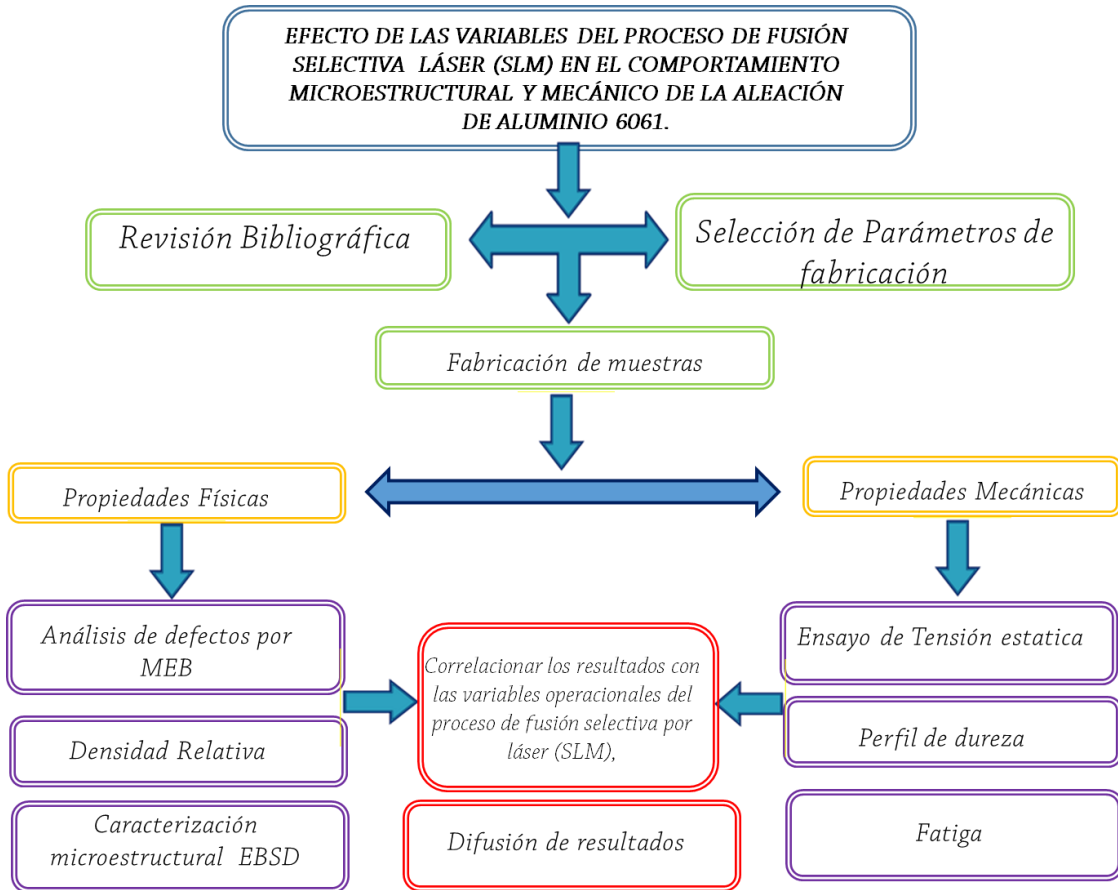


Figura 19. Diseño metodológico para el desarrollo de la tesis.

3.1 Selección de los parámetros del proceso de fabricación.

Uno de los indicadores más utilizados para estudiar la influencia de la combinación de los diferentes parámetros es la densidad de energía superficial (E_{ds}). Esta hace referencia a la cantidad de energía transmitida a la superficie del polvo durante el proceso de impresión y se mide en J/mm^3 . Su valor se obtiene a partir de la ecuación 2 [47]:

$$E_{ds} = \frac{P}{v*d} \quad (2)$$

Se realizó un estudio bibliográfico exhaustivo de diferentes publicaciones de las cuales se determinaron los parámetros adecuados para realizar el estudio; a pesar de que hay pocas investigaciones sobre el AA6061 y conclusiones no tan favorables de sus propiedades mecánicas, se obtuvieron los diferentes cambios en los parámetros para poder realizar su estudio estadístico para el diseño de experimentos como se muestra en la Tabla 4 [31,44].

Parámetros/Experimentos	Potencia (W)	Velocidad (mm/s)	Hatch Spacing (mm)	Scan Pattern (°)	Laser Focus (mm)
1	200	300	0.05	0°	0
2	250	550	0.10	90°	0.10
3	300	800	0.15	45°	0.15
4	350	1050	0.20	0°-90°	0.20
5	400	1100	0.25	0°-45°	0.25
Espesor de capa (μm)		70			

Tabla 4. Parámetros seleccionados del estado del arte del AA6061 fabricados por SLM para el diseño experimental [11-24-31-44-47].

3.2 Fabricación por medio de fusión selectiva por láser (SLM).

Después de seleccionar los parámetros de fabricación del AA6061, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) usando el software MINITAB, debido a que son más de dos factores los que se van a modificar y con la finalidad de explicar la variación en la respuesta debida a la influencia de factores como la potencia del láser, velocidad de escaneo, espaciamiento entre capas (HS), patrón de escaneo y enfoque del láser. Se obtuvieron 25 experimentos con repeticiones de 3, para un total de 75 experimentos realizados como se muestra en la Tabla 5.

Muestra	P (W)	V(mm/s)	Espacio entre capas (mm)	Espesor de capa (mm)	Patrón de escaneo	Focos del láser (mm)	Densidad de Energía (J/mm ³)
1	200	300	0.05	0.07	0°	0	190.48
2	200	550	0.1	0.07	90°	0.1	51.95
3	200	800	0.15	0.07	45°	0.15	23.81
4	200	1050	0.2	0.07	0°-90°	0.2	13.61
5	200	1300	0.25	0.07	0°-45°	0.25	8.79
6	200	300	0.1	0.07	45°	0.2	95.24
7	250	550	0.15	0.07	0°-90°	0.25	43.29
8	250	800	0.2	0.07	0°-45°	0	22.32
9	250	1050	0.25	0.07	0°	0.1	13.61
10	250	1300	0.05	0.07	90°	0.15	54.95
11	300	300	0.15	0.07	0°-45°	0.1	95.24
12	300	550	0.2	0.07	0°	0.15	38.96
13	300	800	0.25	0.07	90°	0.25	21.43
14	300	1050	0.05	0.07	45°	0.25	81.63
15	300	1300	0.1	0.07	0°-90°	0	32.97
16	350	300	0.2	0.07	90°	0.5	83.33
17	350	550	0.25	0.07	45°	0	36.36
18	350	800	0.05	0.07	0°-90°	0.1	125.00
19	350	1050	0.1	0.07	0°-45°	0.15	47.62
20	350	1300	0.15	0.07	0°	0.25	25.64
21	400	300	0.25	0.07	0°-90°	0.15	76.19
22	400	550	0.05	0.07	0°-45°	0.25	207.79
23	400	800	0.1	0.07	0°	0.25	71.43
24	400	1050	0.15	0.07	90°	0	36.28
25	400	1300	0.2	0.07	45°	0.1	21.98

Tabla 5. Diseño de experimentos por el método de Taguchi.

Se utilizó una máquina de Fusión Selectiva Láser SLM 280 HL de SLM Solutions GmbH (Figura 20) para fabricar las muestras del diseño de experimentos. El sistema incluye un láser de alta potencia de Iterbio (Yb). La energía del láser es absorbida por la capa de polvo de metal. Las partículas que se usan son polvos de AA6061 que previamente pasaron por un cribado para obtener tamaños entre 40 μm a 70 μm . Cada capa de polvo se aplica por medio de un mecanismo de *recoater* a una velocidad de 200 mm/min.



Figura 20. Máquina de fusión selectiva láser del CIIA-FIME-UANL.

3.3 Caracterización de defectos por microscopía electrónica de barrido (MEB).

Para caracterizar con mayor detalle y llevar a cabo un análisis más completo de defectos y detección de zonas afectadas térmicamente que pueden presentarse durante la fabricación del AA6061, se realizó una inspección visual con corte transversal y longitudinal de las muestras con el fin de detectar defectos internos, densidad de grietas y poros que afecten la integridad del material, utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). El equipo utilizado fue un Microscopio Marca JEOL Modelo JSM5800LV, mostrado en la Figura 21, utilizando 15kV. Para dicha caracterización, a las muestras se les realizaron todos los procedimientos mencionados en la norma ASTM E-03.



Figura 21. Microscopio electrónico de barrido Jeol JSLM-6510-LVM.

3.4 Caracterización del material por microscopía electrónica de barrido (MEB) y analizador de tamaño de partículas (PSD).

Para caracterizar con mayor detalle, y corroborar las especificaciones del polvo de AA6061 que suministra el proveedor, se tomó una muestra y se utilizó MEB a 500X, el equipo utilizado fue un Microscopio Marca JEOL Modelo JSM5800LV utilizando 15kV; estas micrografías se tomaron con la intención de corroborar que las partículas tuvieran una morfología esférica, y se examinaron de acuerdo con la norma ASTM F3049-14 para la fabricación de polvos metálicos [24].

Los polvos se tamizaron con una malla de 75 μm antes de ser caracterizados para que existiera una mayor homogeneidad, y se realizó una medición de la distribución de tamaño de partículas (PSD) por medio del Microtrac S3500, esta se llevó a cabo utilizando difracción láser dispersando el polvo en agua. La PSD se atribuye por $D(\alpha)$, que representa el diámetro de la partícula medida, donde α es el porcentaje de volumen de partículas que tienen un diámetro menor que el valor D .

3.5 Caracterización del material por medio de difracción de rayos X (DRX).

La difracción de rayos X (DRX) se realizó con el sistema de difracción Panalytical Empyrean (ver Figura 22) con un tubo de rayos X de Cu de 1.8 kW que funciona a una tensión de 45 kV y una corriente de 40 mA. Una fuente de radiación $\text{Cu-}\alpha$ con una longitud de onda de 1.54 Å. Para cada muestra de la aleación, la prueba se realizó con un tamaño de paso de 0.02° dentro de un intervalo 2θ de 20° a 100°, con un tiempo de permanencia que dio lugar a un mínimo de 10,000 recuentos en el pico de mayor intensidad.



Figura 22. Difractómetro de Rayos X Panalytical Empyrean.

3.6 Caracterización de análisis térmico diferencial.

El análisis térmico diferencial (DTA, por sus siglas en inglés) es una técnica termoanalítica que es similar a la calorimetría de escaneo diferencial. En el DTA, el material bajo estudio y una referencia inerte se ponen bajo ciclos térmicos idénticos (i.e., mismo programa de enfriamiento o calentamiento) mientras se registra cualquier diferencia de temperatura entre la muestra y la referencia. Esta temperatura diferencial es entonces graficada contra tiempo, o contra temperatura (curva DTA, o termograma). Los cambios en la muestra sean exotérmicos o endotermos, pueden ser detectados con respecto a la referencia inerte. Así, una curva DTA provee datos en las transformaciones que han ocurrido, como transiciones cristalinas, cristalización, fundido y sublimación. El área bajo un pico DTA es el cambio de entalpía y no es afectado por la capacidad calórica de la muestra [71].

El calor de fusión de estas aleaciones se determinó mediante el análisis térmico diferencial (DTA) que se realizó con una muestra de 10 mg de AA6061 en polvo y una muestra de 10 mg de AA6061 ya impresa por SLM. Las muestras se calentaron a 600°C a una velocidad de 10°C/min en aire utilizando un analizador térmico diferencial [68].

3.7 Caracterización microtextural por medio de difracción de electrones retrodispersados (EBSD).

Para utilizar la técnica de difracción de electrones retrodispersados, las muestras deben tener una preparación metalográfica especial previa, estas deben ser pulidas con lijas de diferentes tamaños, tomando 30 minutos por cada tamaño y posteriormente llevadas a un acabado espejo con paño fino con suspensión de alúmina de 0.3 μm y 0.5 μm y terminando con sílice coloidal de tamaño de partícula de 0.02 μm por 40 minutos, se lavan las piezas con acetona; este último procedimiento se utiliza para eliminar la deformación residual de la superficie. Una vez preparadas, las muestras se introducen en el SEM Marca JEOL Modelo JSM7600F (ver Figura 23) y se giran 75° para que entre la superficie de la muestras y el haz de electrones se forme un ángulo de 4° con una energía ingresada de 20kV. Con esta configuración se incrementa el número de electrones retrodispersados hasta obtener los patrones de dispersión deseados. La emisión de electrones retrodispersados es capturada en una pantalla de cristal líquido, que transfiere la información obtenida de la muestra por medio de los patrones de difracción de Kikuchi a una computadora de alta capacidad de procesamiento a fin de poder post procesar la información de las muestras.



Figura 23. Equipo SEM con módulo de difracción de electrones retrodispersados para obtener la información de textura del material.

3.8 Densidad relativa por medio de la técnica de Arquímedes.

Para determinar la densidad relativa del material, se realizó un ensayo con un kit de determinación de densidad que fue adherido a la balanza OHAUS AV53X como se muestra en la Figura 24. La balanza hidrostática se basa en el Principio de Arquímedes. Primeramente, se calcula la masa del cuerpo (M), depositándolo sobre el platillo de la balanza. A continuación, se suspende el cuerpo en un soporte y se introduce en un vaso o probeta lleno de agua sumergiéndolo totalmente, y viendo el empuje que experimenta. Esto con la finalidad de buscar piezas que tengan densidad por encima del 99%.



Figura 24. Kit de determinación de densidad adherido a la balanza Ohaus AV53X.

3.9 Ensayo de tensión estática.

Para la realización de los ensayos se siguieron los lineamientos acorde a los requisitos especificados en la norma ASTM E8/E8M-15A, las muestras se fabricaron por

medio de SLM como se muestran en la Figura 25 y las pruebas se realizaron en la máquina universal de ensayos mecánicos servo-hidráulica Instron 5960 que se muestra en la Figura 26 usando un extensómetro MTS 634.12F-24 para determinar los valores de módulo de elasticidad (E), resistencia última (σ_u) y resistencia a la fluencia (σ_F), y, de esta manera, poder hacer la correlación con los datos teóricos del AA6061 fabricado por medio tradicional.

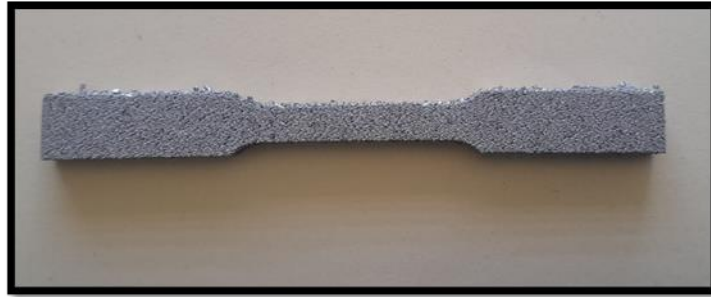


Figura 25. Muestra de tensión fabricada de acuerdo con la norma ASTM E8.



Figura 26. Máquina universal servo-hidráulica Instron 5960.

3.10 Ensayo de perfil de dureza.

El ensayo de microdureza Vickers es un método para medir la dureza de los materiales. La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración o el rayado. Para ensayar la dureza se utiliza una máquina con un penetrador de diamante con forma de pirámide el cual tiene un ángulo de 136° . El ensayo consiste en penetrar la pirámide en el material con una carga conocida, una vez realizada la penetración se mide la dimensión de las diagonales del cuadrado que se dibuja y se realiza un promedio de las dos medidas obtenidas. Se aplicó el ensayo de dureza a 3 muestras de aluminio AA6061 en condiciones originales con la finalidad de cuantificar la dureza del material comparando con el fabricado por fusión selectiva por láser. También se realizó un perfil de micro durezas para determinar los valores en diferentes puntos de fabricación y correlacionar los datos con las otras propiedades mecánicas del material; este se realizó con un Durómetro Knoop/Vickers 400 series de Wolpert Wilson Instruments como el que se observa en la Figura 27.



Figura 27. Durómetro Knoop/Vickers 400 series de Wolpert Wilson instruments.

3.11 Ensayo de fatiga.

Se hicieron ensayos de fatiga en la máquina universal servo-hidráulica Instron 5960 que se muestra en la Figura 28, estos se realizaron para determinar los valores característicos en el diagrama tensión-carga cíclica, donde se representa el número de ciclos hasta la rotura de la probeta frente a la amplitud de las tensiones cíclicas y así determinar

la vida útil del material. Los resultados obtenidos se correlacionaron tanto física, microestructural y mecánicamente con el fin de establecer mejoras en la metodología de fabricación. En la Figura 29 podemos observar una muestra fabricada por SLM para el ensayo de fatiga, esta se fabricó de acuerdo con los requisitos exigidos en la Norma ASTM E466 [27].



Figura 28. Máquina universal servo-hidráulica Instron 5960

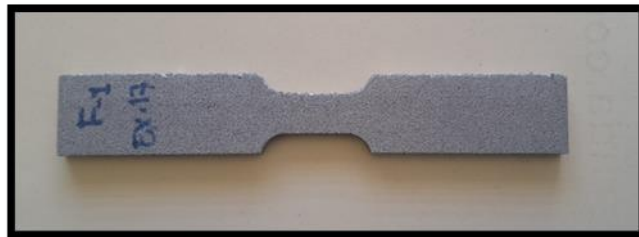


Figura 29. Material de Prueba para ensayo de fatiga fabricado por SLM.

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de deformaciones de fatiga, las probetas se someten a diferentes deformaciones repetidas o variables de magnitudes especificadas y, así, se cuentan los ciclos o alternaciones de esfuerzos que soporta el material hasta la ruptura. Para determinar los datos iniciales de la prueba se debe tener el esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura del material y hallar la curva esfuerzo - deformación tanto ingenieril como real para determinar el coeficiente de endurecimiento (K) y el exponente de endurecimiento (n).

Para determinar la resistencia a la fatiga de un material es necesario un gran número de pruebas debido a la naturaleza estadística de la fatiga. En este caso se utilizaron 24

muestras, de las cuales solo 9 quedaron dentro del rango y a las cuales se les realizó el procesamiento estadístico para hallar los valores iniciales de la prueba.

- a) Se realizaron deformaciones desde 0.001 a 0.004.
- b) Se midieron las muestras de ancho y espesor en la sección reducida.
- c) Se marcó el centro de la muestra y se midió 12.5 mm a ambos lados del centro de la muestra para indicar dónde debía ir el extensómetro.
- d) Se pusieron las muestras en la maquina universal de ensayos y se dispuso a introducir los datos requeridos para iniciar la prueba, se pusieron los límites de deformación de esta y se dejaron hasta los 100,000 ciclos como lo indica la Norma ASTM E606.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas durante la investigación, así como la comparación de esta investigación con otros trabajos anteriormente presentados, dando especial énfasis en los valores de comparación de los parámetros, densidad relativa, tensión y microdureza adquiridos de forma experimental.

4.1 Caracterización de polvos del AA6061 por microscopía electrónica de barrido (MEB).

La Figura 30(a) muestra una micrografía de las muestras de polvo de AA6061 hechas por microscopía electrónica de barrido; se observan partículas de diversos tamaños que van desde 20 μm , hasta 50 μm . Estas últimas también se conocen como satélites y pueden causar problemas al momento de la impresión, por lo cual se realizó un tamizaje para ayudar a eliminarlos y obtener una impresión homogénea. Tan et al [10] y Maamoun et al [51] enfatizan que una combinación de un amplio rango de partículas finas y gruesas puede aumentar la densidad de empaquetamiento del polvo, pero reduce la fluidez como resultado del efecto de la cohesión del polvo y las fuerzas Inter partculares. En la figura 30(b) se puede identificar una partícula de AA6061 esférica y libre de satélites, este tiene un tamaño del alrededor 20 μm , tamaño promedio requerido para la impresión con buena calidad.

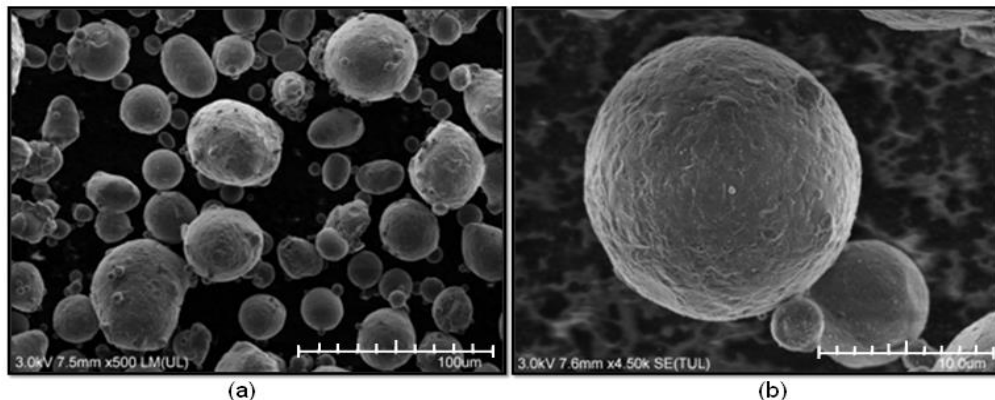


Figura 30. Imágenes de SEM del AA6061 en secundarios.

En la figura 31(a), se muestra la gráfica del perfil del tamaño de distribución de partícula de los polvos del AA6061 mostrando un perfil positivamente simétrico hacia la derecha. Con este perfil de tamaño de partícula se mejora la calidad superficial de las piezas obtenidas y una mayor densidad en comparación con los grados de distribución negativamente simétricos hacia la izquierda; eliminando las partículas pequeñas podríamos aumentar la absorción de energía del láser [11]. Posteriormente, la distribución de

partículas se comparó con el estudio de Ihsan [20], quien estudió diferentes tipos de polvos de aluminio y el tipo de distribución aceptable para lograr buenas propiedades del material cuando se fabrica con la técnica de fusión selectiva láser, como se puede observar en la Figura 31(b). Los datos cuantitativos muestran que el tamaño de las partículas oscila entre 0-20 μm , 20-60 μm , 60-120 μm , con un promedio de 45 μm los que, al realizar la comparación con el estudio de Ihsan, se puede observar que se encuentra dentro del 11% de los parámetros de estudio del material que se han realizado hasta el momento.

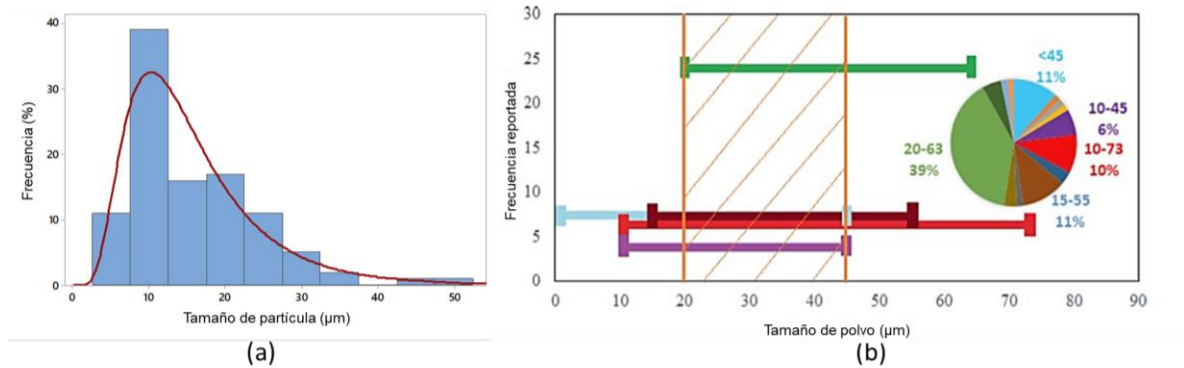


Figura 31. (a) Distribución normal de partículas del polvo Al6061 encontradas en el material utilizado en este estudio. (b) Estudio de Ihsan de distribución de polvo de diferentes estudios de Ihsan [20].

4.2 Caracterización de polvos de AA6061 por difracción de rayos X (DRX).

Como se muestra en la Figura 32, se detectó presencia de alfa-Al con estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC), se puede observar 2-theta de muy baja intensidad que indica la presencia de Mg_2Si . Cabe señalar que este compuesto es de difícil detección mediante DRX porque, generalmente tiene un tamaño de partícula de 20-40 nm. Así mismo, se puede observar que la diferencia en la anchura de los picos de Al y Si entre las muestras indica un cambio en el tamaño del cristal bajo diferentes parámetros del proceso SLM [22,23]. De la misma manera Maamoun et al. [51] indica en su trabajo que el cambio en el ensanchamiento del pico de Al a lo largo del plano XY y la dirección Z indica un cambio en el tamaño del cristal de Al, este cambio se investiga detenidamente y se obtiene un pico de Al más ancho con una densidad de energía baja de 50 J/mm^3 , lo que confirma el crecimiento del tamaño de grano a medida que aumenta la densidad de energía. Según la ecuación de Scherrer, el pico más agudo en el patrón de fase de DRX indica un cristal más grande [51,64].

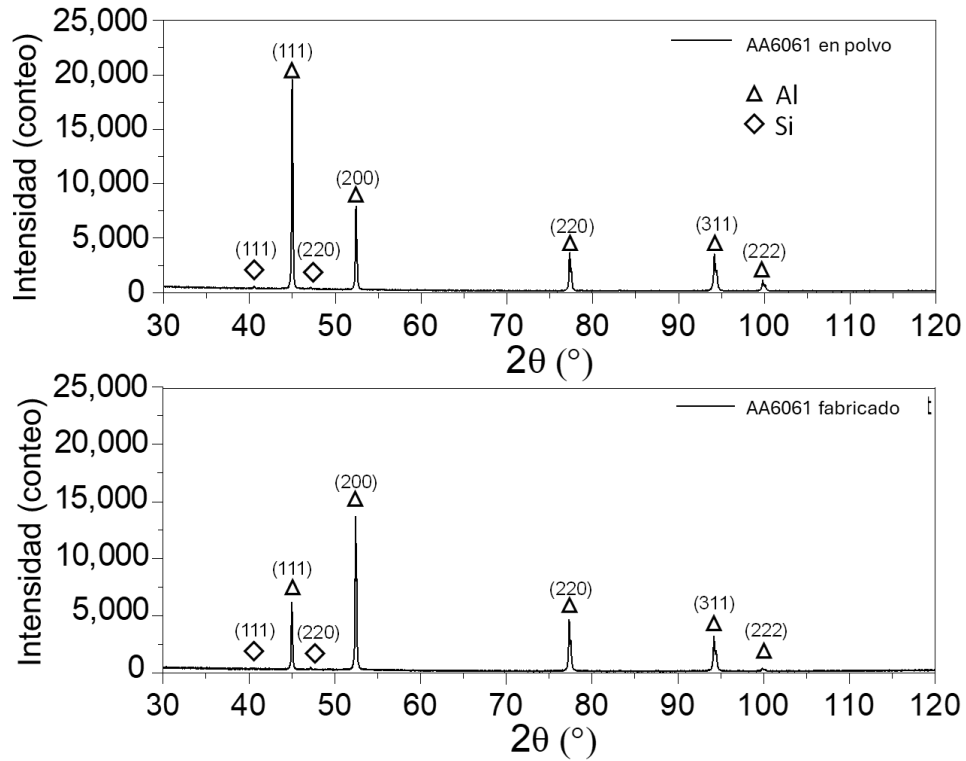


Figura 32. Patrones de DRX del polvo de AA6061 y de las muestras procesadas por SLM.

4.3 Determinación del calor de fusión por análisis térmico diferencial (DTA).

En la Figura 33 se muestran las curvas DTA del aluminio AA6061 en polvo y una muestra impresa. Es evidente que para ambas aleaciones existe un intervalo de temperatura entre el punto de fusión incipiente, donde presenta una fase líquida y una temperatura de fusión. El punto de fusión incipiente 575°C en el AA6061 impreso es 25°C mayor que el del AA6061 en polvo. Se observa que, el punto de fusión con menor temperatura se debe a una disolución progresiva de los componentes de la aleación que, al aumentar la temperatura, se genera una reacción exotérmica a $T \leq 550^\circ\text{C}$ seguida de una reacción endotérmica [30].

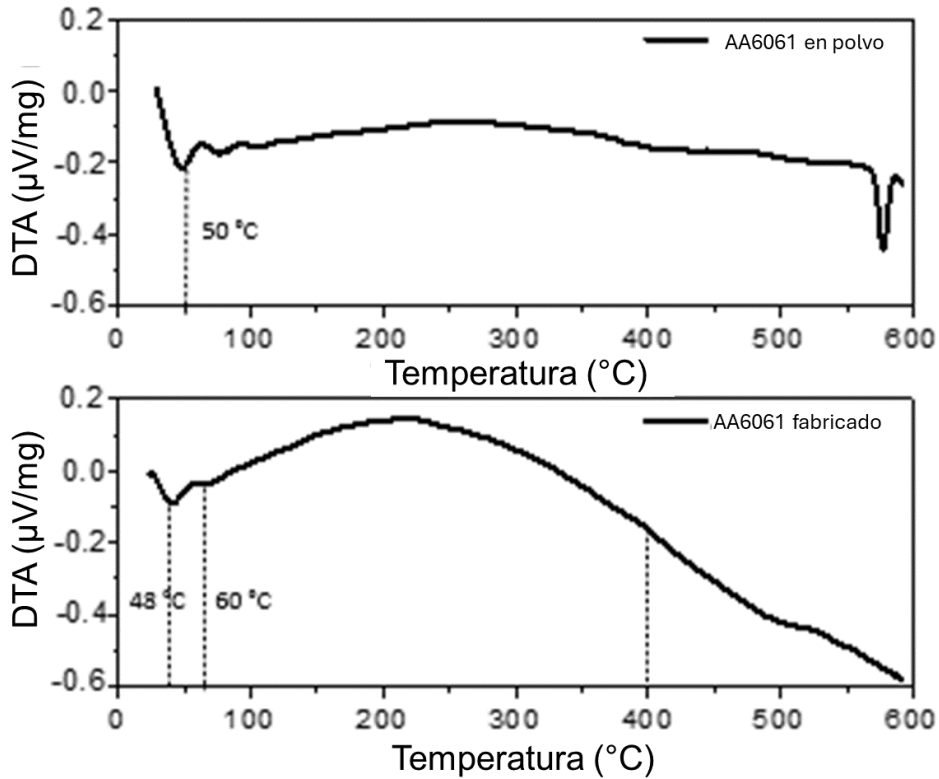


Figura 33. Curvas DTA del AA6061 en polvo y ya impreso por medio de la técnica SLM.

4.4 Correlación de la densidad relativa y porosidad del material por medio de Arquímedes.

Se realizó la impresión de las 25 muestras de la Tabla 5 con AA6061 utilizando un sistema de fusión selectiva por láser SLM 280 HL, que incluye un láser de iterbio (Yb) de alta potencia, se colocó en una plataforma de 280 X 280 mm para agilizar la fabricación de todas las muestras del diseño de experimentos, cada muestra que se fabricó tiene una dimensión de 10 X 10 X 20 mm y la distribución de las muestras dentro de la impresora puede verse en la Figura 34.

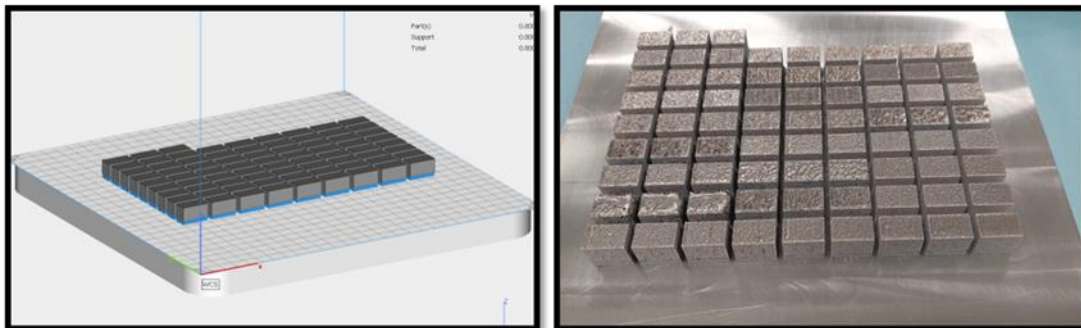


Figura 34. Distribución de las muestras impresas en el equipo SLM280.

Para determinar qué parámetro influye en la densificación del AA6061, se realiza una correlación entre la densidad relativa medida mediante la técnica de Arquímedes bajo la norma ASTM B962-17 y la densidad energética con los datos DOE mostrados en la Tabla 5 y calculados mediante la Ecuación 2 para determinar los parámetros que consiguen densidades relativas superiores al 99%; la Figura 35 muestra que de las 25 muestras evaluadas, las que presentan mayor densidad relativa son las que se encuentran en el espectro de 30 a 50 J/mm³. Dentro de la misma comparación, existen parámetros de mayor influencia como la potencia del láser, la velocidad de escaneo, el espacio entre capas y el patrón de escaneo que ayudan a tener una variabilidad en el proceso, mostrando rangos de densidad energética de las muestras con mayor porcentaje de densidad y separándolas gradualmente de las de menor porcentaje de densidad. Un parámetro de gran influencia en la disminución de la densidad del material es la velocidad de escaneo, ya que si se trabaja a velocidades superiores a 800 mm/s en un rango de potencia promedio de 350 W al realizar el cálculo, las muestras se encuentran dentro del espectro de densidad de energía que puede generar alta densidad, pero existe una disminución del 2% en su densidad relativa a la esperada debido a que al realizar una fusión rápida del material entre capas el proceso no permite que se densifique adecuadamente debido a la formación de gases de hidrógeno [4,16,20,21].

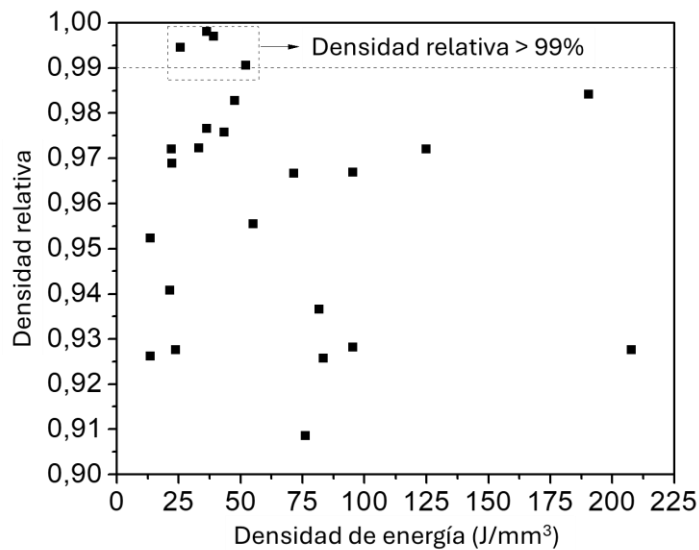


Figura 35. Gráfico comparativo de densidad de energía y densidad relativa.

Después de analizar la densidad relativa con respecto a la densidad de energía, se escogieron 4 muestras que dieron resultados por encima del 99%, a las cuales se les realizaron cortes transversales y longitudinales para hacer un análisis de defectos internos del material y poder comparar el porcentaje de porosidad y así cómo los parámetros de fabricación influyen en estas. La Figura 36 muestra las observaciones microscópicas de las muestras pulidas de AA6061 fabricadas con los diferentes parámetros del proceso de SLM indicados en la Tabla 5, que presentaron mejor densidad relativa como son las muestras 2,

12, 17 y 20. Se observaron diferentes tamaños de microfisuras a lo largo de la dirección Z y el plano XY en las muestras con potencia de láser de 300 W y 350 W, con un menor porcentaje de porosidad en comparación con las muestras fabricadas a 200 W, las cuales muestran poros de hidrógeno de forma esferoidal con un porcentaje de 2.12%.

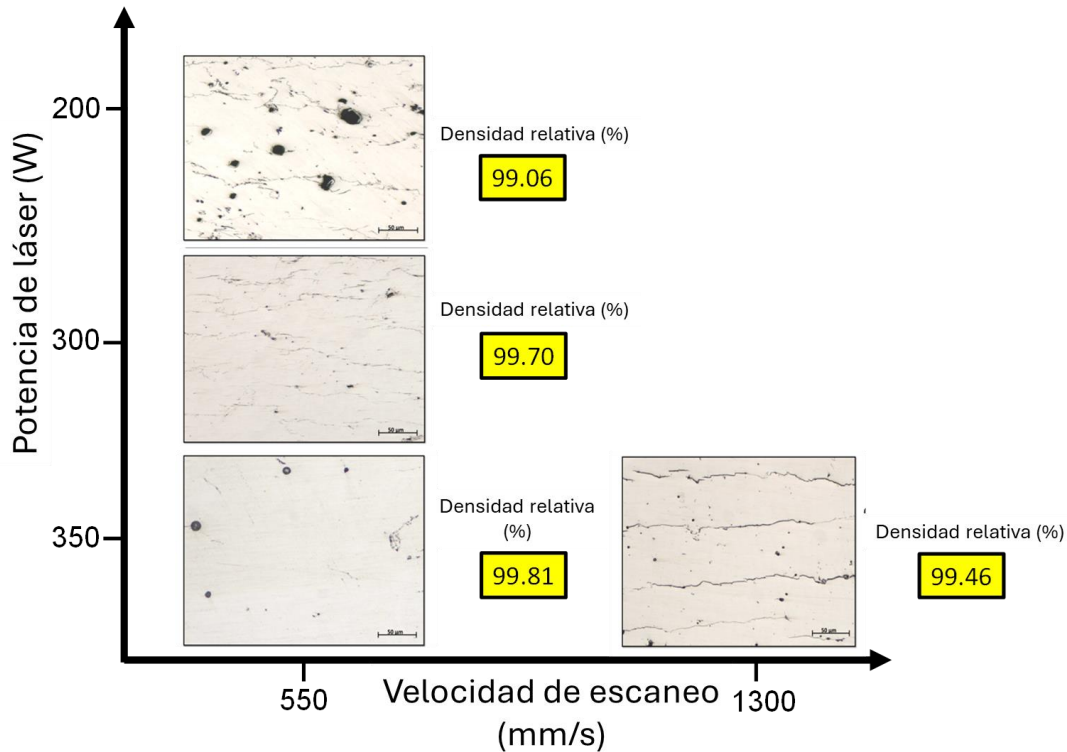


Figura 36. Análisis de porosidad de las muestras con densidad relativa por encima del 99%.

Los resultados mostraron que la velocidad del láser es el parámetro que influye mayormente en la formación de grietas, pero al reducir la velocidad se generó una disminución significativa en la porosidad, por lo que se puede concluir que el patrón de escaneo en 0° pudo influir en la formación de dichas grietas en la muestra 20 con velocidad de 1,300 mm/s. La densidad de energía de la muestra con la menor densidad relativa de 99.06%, presenta un mayor porcentaje de porosidad con una densidad de energía de 47 J/mm^3 y una velocidad de escaneo de 550 mm/s. Sin embargo, la densidad de energía de las otras muestras, donde se ve una reducción significativa de porosidad, es más baja ya que se encuentran entre 25 y 39 J/mm^3 con una velocidad de escaneo de 550 mm/s y 1,300 mm/s, respectivamente. Después de analizar las muestras, se concluye que las muestras que presentan menor porcentaje de porosidad y menor densidad de grietas son la 12 y la 17, que fueron fabricadas a una velocidad de escaneo de 550 mm/s y una potencia variable entre 300 y 350 W; estas, además, manejan una densidad de energía óptima de fabricación de 36 y 39 J/mm^3 . Posteriormente, se realizó otro diseño de experimentos con muestras que se encuentren dentro del mismo rango de densidad de energía, enfocándose en el patrón de escaneo.

Para identificar los defectos internos del material, se realizó un análisis cuantitativo de la densidad de grietas, que se define como la longitud total de la grieta por unidad de área a partir de al menos cinco micrografías ópticas por cada muestra, en las secciones transversales XY y XZ. En la Figura 37 se puede observar que la densidad de grieta para AA6061 es, en general, ligeramente mayor en la sección XY que en la sección XZ, también se puede observar que se presenta una mayor densidad de grieta cuando hay densidades de energía bajas, entre 20 y 30 J/mm^3 , y muy altas, entre 50 y 55 J/mm^3 . La muestra fabricada con una velocidad de barrido de 550 mm/s y una potencia de láser de 350 W presentó la densidad relativa más alta, 99.81%, por lo tanto, presentó una menor densidad de grietas [32,33,36].

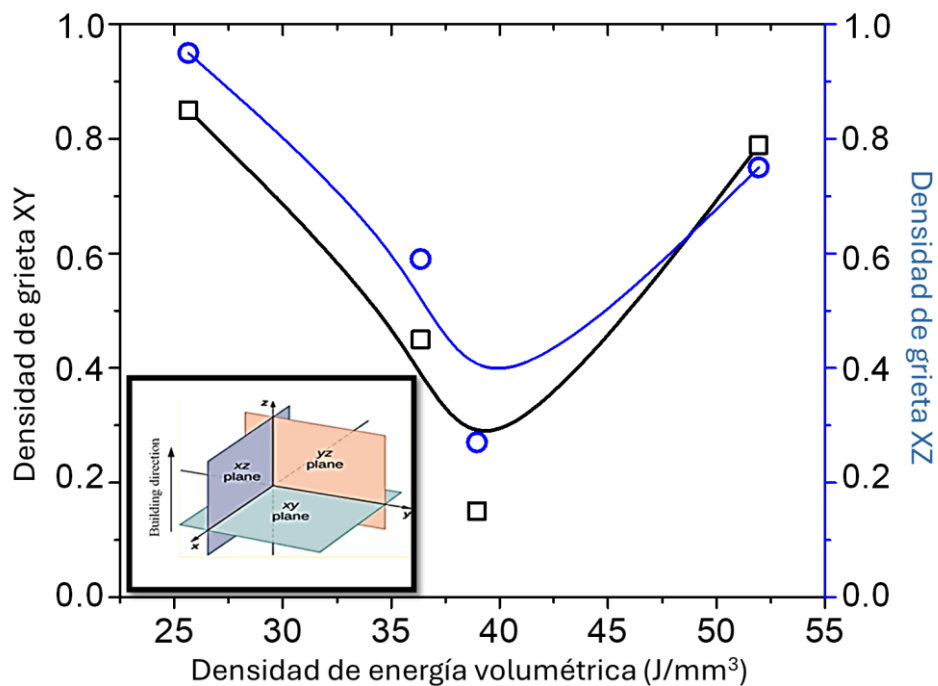


Figura 37. Solidificación de la densidad de grietas en aleaciones AA6061 en secciones transversales análisis XY y XZ.

Con el objetivo de obtener los parámetros óptimos de fabricación, se realizó un estudio ANOVA sobre las muestras fabricadas mediante SLM de la Tabla 5. Para analizar la consistencia del proceso se realizó un estudio de repetibilidad y reproducibilidad que permitió comprender el comportamiento del material utilizando esta técnica de fabricación. La repetibilidad del proceso indicó la variación que se produce durante el proceso utilizando los mismos parámetros, esto quiere decir que se utiliza el mismo diseño de muestra, la misma distribución, y los mismos parámetros en todos los casos y se analiza la variabilidad entre ellos. Parámetros como la potencia del láser, la velocidad de escaneo, el espaciado de las capas, el patrón de escaneo y el enfoque del láser, en conjunto producen

un cambio significativo en la densificación del AA6061, y disminuyen los defectos presentes en investigaciones anteriores [25-28].

La Tabla 6 muestra los valores medios de respuesta para cada factor, clasificados en los 5 niveles estudiados. En este caso, el valor Delta, o la correlación entre cada nivel, es mayor para la distancia entre capas. Esto indica que es el factor más significativo o con mayor influencia en la densidad relativa resultante de las piezas fabricadas, seguido del foco del láser en segundo lugar, el patrón de barrido en tercer lugar y la velocidad en cuarto lugar. En diferentes estudios se ha demostrado que la densidad de las piezas depende de la densidad de energía (E), un concepto en el que intervienen la potencia, la velocidad de barrido y la HS, como se mostró en la ecuación 2.

Nivel	Potencia (W)	Velocidad (mm/s)	Hatch Spacing (mm)	Patrón de escaneo (°)	Foco del láser (mm)
1	0.9473	0.9427	0.9552	0.9737	0.9800
2	0.9587	0.9778	0.9759	0.9578	0.9578
3	0.955	0.9552	0.9606	0.9608	0.9543
4	0.9747	0.9549	0.9632	0.9562	0.9565
5	0.9503	0.9552	0.931	0.9378	0.9373
Delta	0.0274	0.0351	0.0448	0.0359	0.0428
Rango	5	4	1	2	3

Tabla 6. Resultados obtenidos del análisis de ANOVA.

También se ha demostrado que la apertura del láser está directamente relacionada con la densidad relativa, se modifica también el tamaño del láser y por lo tanto la densidad de potencia (PD) entregada en la cama de polvo como se muestra en la Ecuación 3, donde se puede calcular el radio del láser ω , que a su vez se correlaciona con otros parámetros en la Ecuación 4, donde ω_0 es el radio mínimo del láser, z es la distancia del foco y z_r es el rango de Rayleigh [29].

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

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

Bean [29] presenta cómo cambiar la apertura del láser tiende a reducir la densidad de energía sin cambiar los parámetros P, HS y V del láser. Dado que en el DOE presentado, todos los parámetros fueron variados, se propone la Ecuación 3, en la cual el PD está involucrado en la ecuación de densidad de energía. Existe un patrón relativo a esta ecuación, en la que valores muy grandes o pequeños de E dan lugar a una menor densidad relativa (Ecuación 5).

$$E = \frac{DP/HS}{v} \quad (5)$$

Se utilizó el método Taguchi para estudiar las variables del proceso que podían afectar a la calidad de las piezas y se limitaron los ensayos experimentales. La optimización Taguchi indica que los valores con la mayor relación observada en el diagrama de efectos principales para cada factor son los que darán el mejor resultado, como se muestra en el diagrama de superficie de respuesta (Figura 38), que determina estadísticamente las condiciones óptimas de las combinaciones posibles para una densidad relativa alta; se observa que es posible tener densidades entre 97% a 98%, si se maneja una apertura del láser de 0, una potencia láser de 350 W, una velocidad de 550 mm/s, un espaciado entre trampillas de 0.10 mm y un patrón de barrido de 0°. Aunque las condiciones óptimas que utilizan Taguchi son similares a las experimentales, existe una contribución porcentual correspondiente a cada variable de salida diferente, que, al variar los 3 primeros parámetros que influyen en la densidad relativa, aumenta sustancialmente la densificación del material.

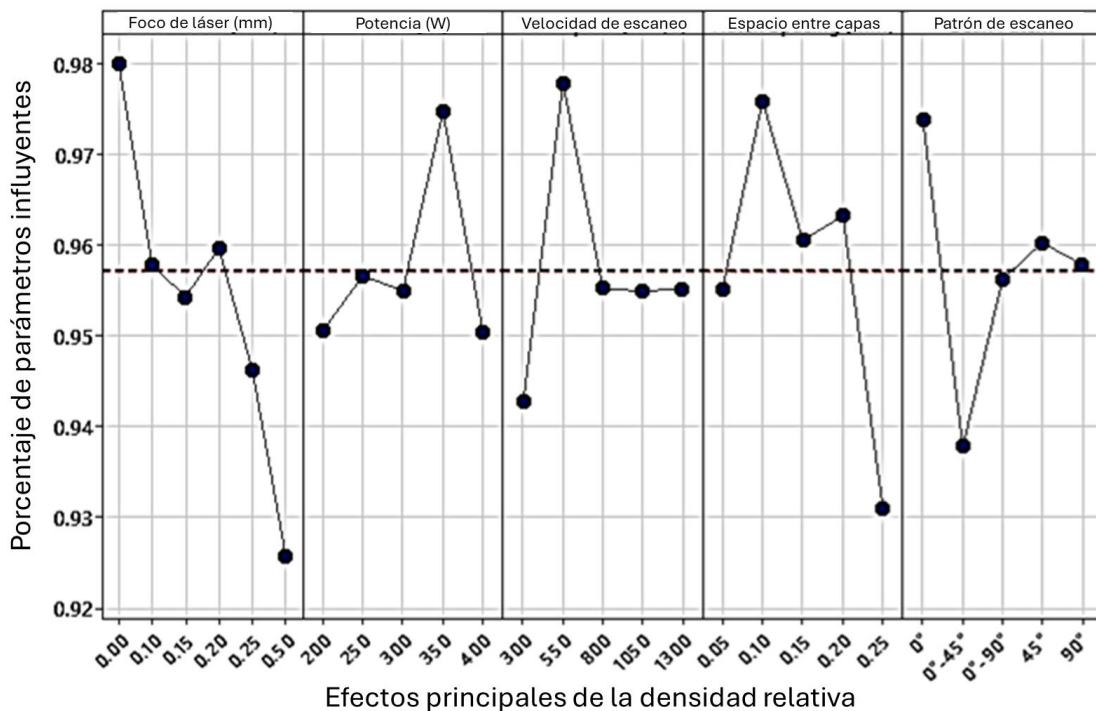


Figura 38. Gráfica de efectos principales por análisis ANOVA.

Los valores medidos a lo largo del plano XY se utilizaron para generar los modelos de regresión que representan el efecto de los parámetros en la SLM con cada característica. La Figura 39 muestra las curvas de los parámetros de fabricación, se observa que el espaciado entre capas, la velocidad de escaneo y la apertura del láser son los parámetros que afectan principalmente a la densificación de fabricación del material, ya que el ANOVA dio valores de interacción para P inferiores a 0.05 y con porcentajes de contribución del 14.87%, 24.38% y 20.87% respectivamente. Cuanto menor es la velocidad de barrido, mayor

es la separación entre capas; y con el foco del láser al mínimo, pueden obtenerse densidades relativas más altas entre 99.4% y 99.8%. El ángulo entre la muestra y la plataforma es un parámetro que requiere mayor investigación, ya que, aunque no contribuye directamente, sí afecta a la densificación, generando porosidad.

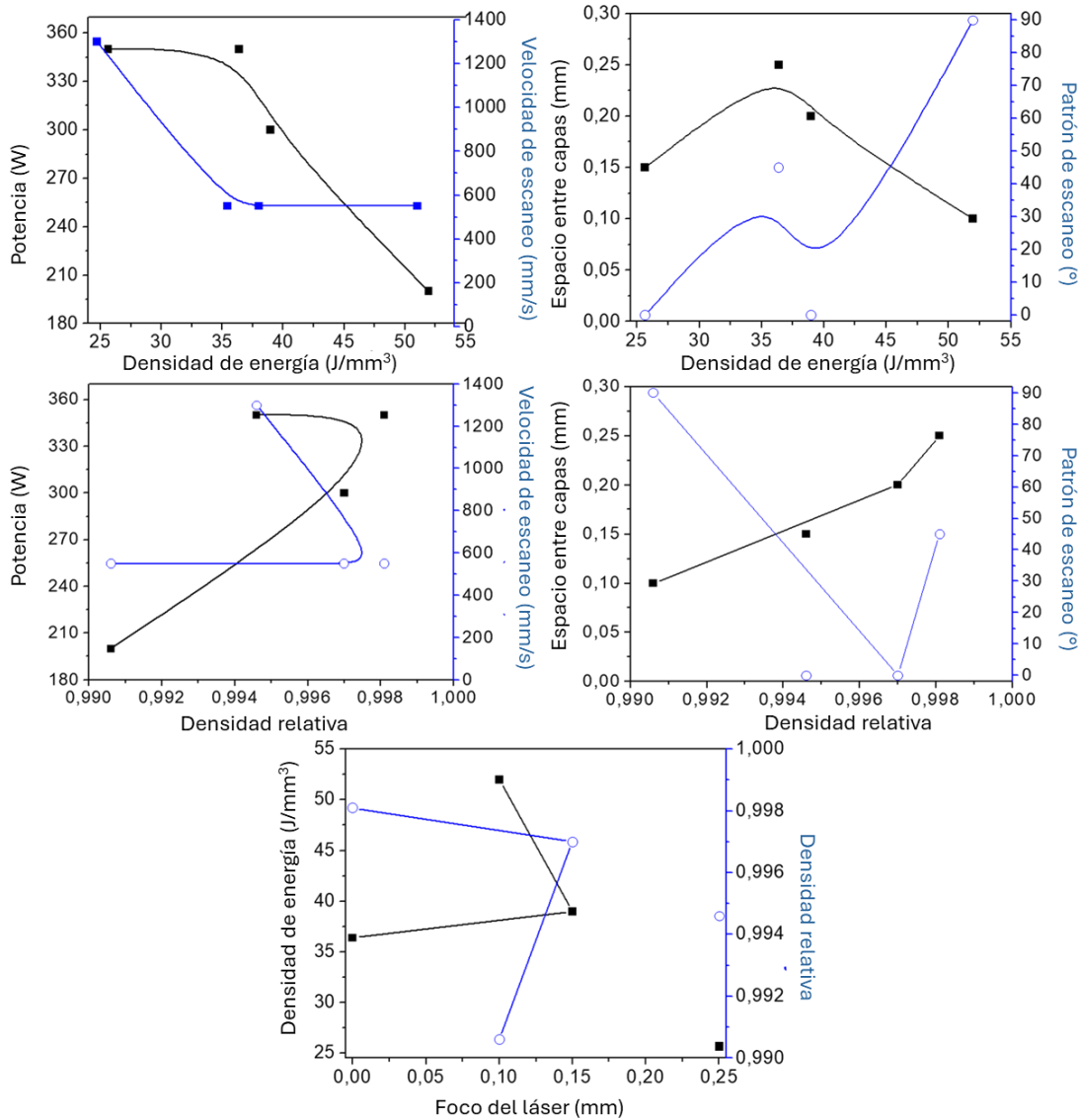


Figura 39. Parámetros principales de fabricación AA606 por medio de regresión.

También se observa que, una distancia efectiva entre capas mejora no sólo la unión entre capas adyacentes sino también el traslape entre capas dependiendo del tipo de escaneo de fabricación seleccionado. Por otro lado, para este material, el espesor de capa se fija en 70 μm . Sin embargo, se prefieren separaciones mayores de 0.15 mm entre capas, ya que se acumula suficiente calor en el baño fundido, reduciendo así la velocidad de enfriamiento [32], la cual permite la formación de una capa continua y homogénea.

En la Tabla 7 se muestran los parámetros experimentales que obtuvieron mayor densidad relativa y se encuentran por encima del 99%, de acuerdo a lo analizado se observa que las muestras que presentaron máxima densidad interna corresponde a las muestras 12 y 17. Por lo tanto, las muestras 2 y 20 se descartaron para realizar las pruebas mecánicas, debido a la densidad de grieta que presentaron y a que sus densidades de energía se encuentran fuera del rango de 30 a 40 J/mm³, esto se atribuye a la posición en la que las muestras se colocaron en la cama de polvos. También cabe destacar que los parámetros indicados en la Tabla 7 sirven como base para fabricar muestras con una densidad relativa superior del 99%.

Muestra	Potencia (W)	Velocidad (mm/s)	Hatch Spacing (mm)	Patron escaneo	Foco del Laser (mm)	Densidad de energía (J/mm ³)	Densidad Relativa
2	200	550	0.10	90°	0.10	51.95	99.06%
12	300	550	0.20	0°	0.15	38.96	99.70%
17	350	550	0.25	45°	0	36.36	99.81%
20	350	1300	0.15	0°	0.25	25.64	99.46%

Tabla 7. Parámetros de manufactura con mejor densidad relativa del AA6061.

4.5 Caracterización microestructural.

El proceso de SLM, al requerir una fuente de calor concentrada, puede resultar en algunas modificaciones en el material debido al ciclo térmico producido capa por capa en el componente por el haz del láser, que incluyen alteraciones a la microestructura y esfuerzos residuales, cabe señalar que, esta técnica es más similar al proceso de soldadura que a la fundición [38].

Las Figuras 40 y 41 muestran micrografías de las secciones transversales XZ de las muestras 12 y 17 fabricadas con los parámetros 350W - 550 mm/s con una variación en el patrón de escaneo de 0° a 90°, espacio entre capas y el foco del láser. En ambas se observan grietas orientadas paralelamente al espacio entre capas, en la Figura 40(a) y 41(a), se muestran granos grandes columnares paralelos a la orientación de las grietas.

La micrografía de gran aumento de la Figura 40(b) que corresponde a la muestra 12, muestra una región que contiene alberca de fusión no muy delimitada y no muy profunda, generando espacios con falta de fusión ocasionando defectos que afectan la integridad de la muestra. Mientras que la micrografía de la figura 41(b) presenta una alberca de fusión más profunda y homogénea y granos columnares leves entre los límites de las albercas de fusión donde evita que se presente defectos.

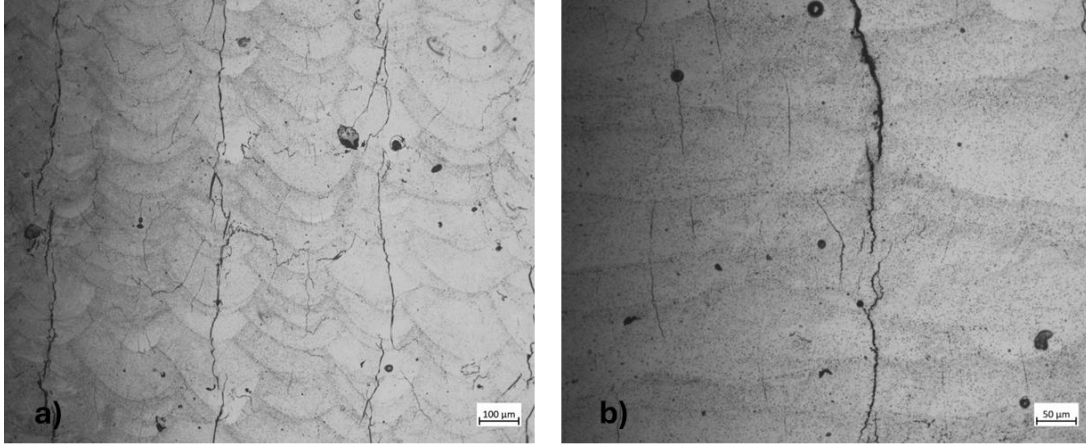


Figura 40. Micrografías SEM de las secciones transversales XZ de la aleación AA6061, muestra 12 (a, b).

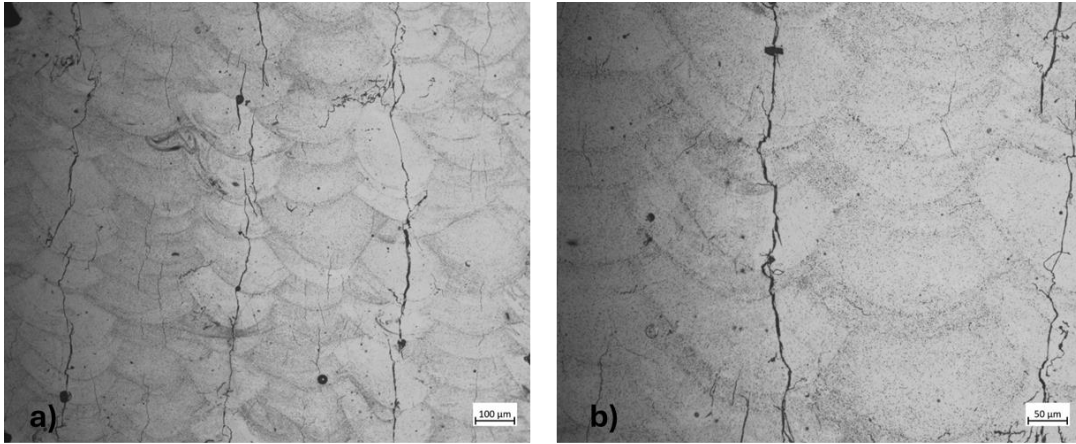


Figura 41. Micrografías SEM de las secciones transversales XZ de la aleación AA6061, muestra 17 (a, b).

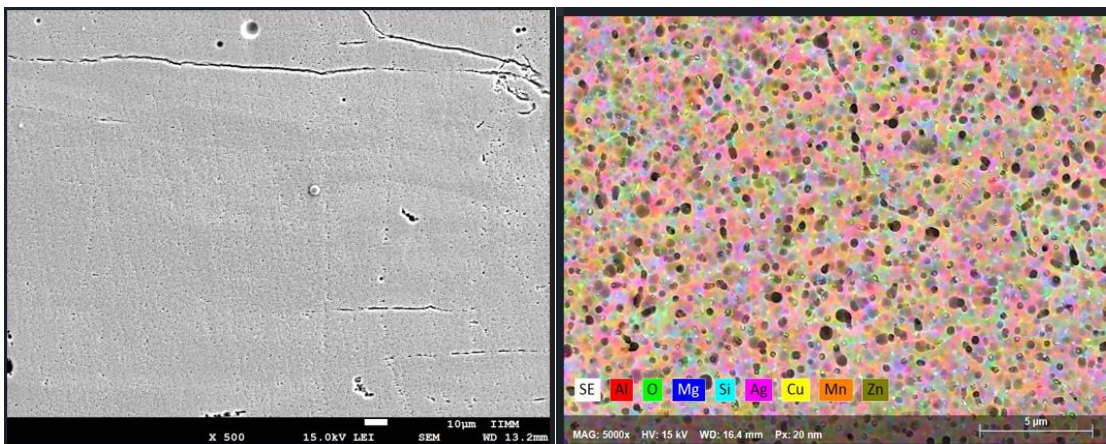


Figura 42. Micrografía y mapeo de la muestra 12.

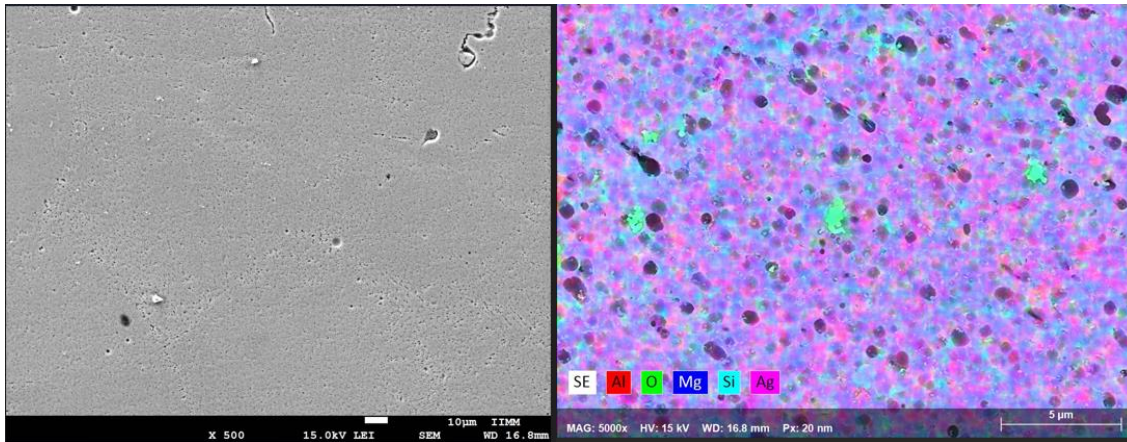


Figura 43. Micrografía y mapeo de la muestra 17.

En la figura 42(b) y 43(b) se puede observar una micrografía SEM con su respectivo mapeo para determinar la cantidad de componentes químicos del material distribuido; en el centro del baño de fusión, se forma una microestructura no homogénea de coexistencia de fases ricas en Al y ricas en Si. El enfriamiento rápido ayuda a retener la matriz supersaturada rica en Al y las partículas ricas en Si. La microestructura fina junto con el mecanismo de solidificación conduce a la formación de piezas con una buena dispersión de todos los elementos de aleación [48]. Aunque las muestras 12 y 17 muestran matrices de granos muy parecidas, la de la Figura 42(b), presenta tamaño de grano mas pequeño el cual puede influir en las propiedades mecánicas del material volviendolo mas frágil.

4.6 Resultados de pruebas de tensión.

Se realizaron ensayos de tensión estáticas a 0°, 45° y 90° con base en los requisitos especificados en la norma ASTM E8/E8M-15A, a las dos muestras que presentaron densidades superiores al 99%; al realizar las pruebas de tensión, se detectó que la muestra 12 presentaba una gran fragilización en el material y no brindaba datos suficientes para generar valores para graficar, mientras que la muestra 17 tuvo su ruptura a un esfuerzo más bajo que el AA6061 tradicional; se obtuvieron valores de esfuerzo máximo de alrededor de 300 MPa. En la Tabla 8 se pueden observar los datos promedio obtenidos del ensayo de tensión.

Ensayo	% E	Esfuerzo (MPa)		
		Fluencia	Máximo	Ruptura
AA6061 Muestra 12	---	---	---	---
AA6061 Muestra 17	1.2	42.1	52.3	52.3

Tabla 8. Datos de la prueba de tensión estática muestra 12 y 17 fabricadas por SLM.

En la Figura 44 se observa que las pruebas realizadas a 0°, 45° y 90° de la muestra 17, presenta una gran disminución de ductilidad, rompiendo la muestra poco después que

el material llegara al límite de fluencia, también se puede observar que cuando se somete la muestra a tensiones en dirección a 0° el esfuerzo cae drásticamente, esta fragilidad no es usualmente esperada para este tipo de material.

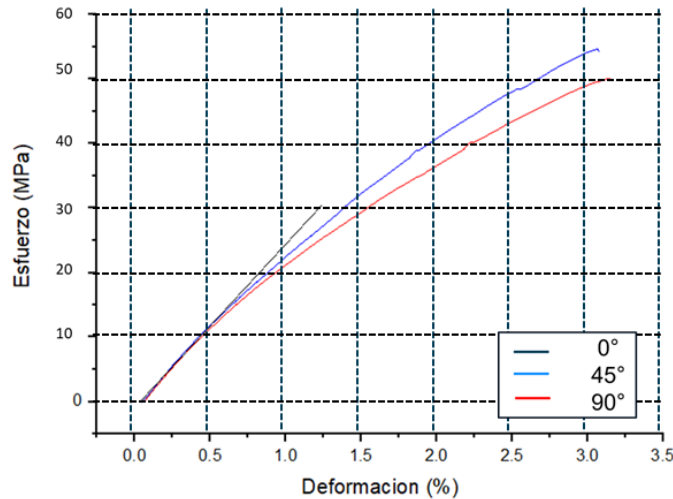


Figura 44. Gráfica de tensión muestra 17 fabricada por la técnica de SLM.

Debido a que las propiedades mecánicas no fueron las esperadas, a cada una de las muestras 12 y 17 se les realizó un tratamiento térmico T6 que consiste en un temple y envejecido como se muestra en la Figura 45, se llevaron las muestras a 538°C por espacio de 6 horas con temple en agua y luego se realizó un envejecimiento a 220°C por espacio de 1 hora. Se observó que esta aleación tiene alta colabilidad y este tratamiento térmico es de gran ayuda, debido a que se mejoran las propiedades mecánicas, específicamente tensión y ductilidad.

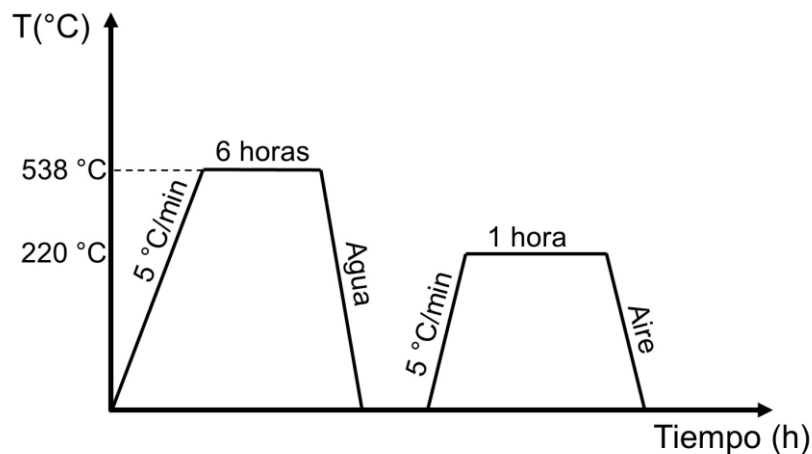


Figura 45. Rampa de temperatura del tratamiento térmico T6 para AA6061 realizadas a las muestras 12 y 17.

Después del tratamiento térmico se observó un aumento significativo de propiedades mecánicas, como se muestra en la Tabla 9, donde se encuentran los datos promedios de las pruebas de tensión, se detectó un aumento casi del doble de las pruebas iniciales, soportando esfuerzos de 213.46 MPa y 216.73 Mpa, con un porcentaje de elongación con valores entre 2.9% y 5.1%. También se puede observar en la Figura 46, un aumento de ductilidad en cualquiera de las direcciones que se requieren para corroborar la anisotropía del material.

Ensayo	% E	Esfuerzo (Mpa)		
		Fluencia	Máximo	Ruptura
AA6061 Muestra 12	12.987	169.73	213.46	154.13
AA6061 Muestra 17	15.139	170.46	216.73	158.36

Tabla 9. Datos de la prueba de tensión estática muestra 12 y 17, después de ser sometidas a tratamiento térmico.

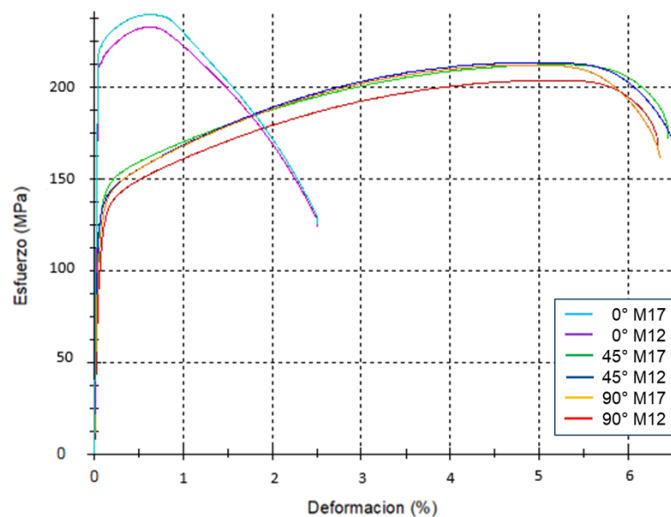


Figura 46. Gráfica de tensión muestras 12 y 17 fabricadas por la técnica SLM y sometidas a tratamiento térmico.

4.6 Resultados de pruebas de dureza.

Se realizaron pruebas de microdureza en las albercas de fusión y se obtuvo un promedio de las microdurezas obtenidas de las muestras 12 y 17 con y sin tratamiento térmico; se observa que las muestras sin tratamiento térmico (figuras 47 y 48), muestran una dureza mucho mayor que las tratadas térmicamente; correlacionándolo con las pruebas de tensión, observamos que su incremento de dureza en las muestras fabricadas por SLM sin tratamiento térmico, genera una fragilidad y baja ductilidad en el momento que se le genera la prueba de tensión.

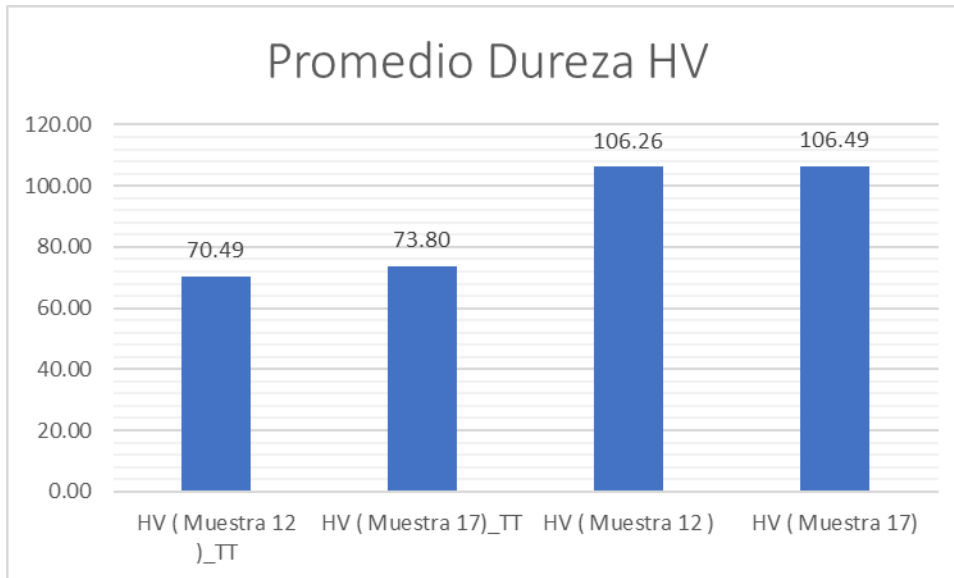


Figura 47 Gráfica de "promedios" de durezas Vickers de las muestras con tratamiento térmico y sin tratamiento térmico.

Por Lo tanto, la velocidad de escaneo es uno de los parámetros que tiene más influencia sobre los valores de microdureza, este factor puede ser atribuido al tiempo en que el haz del láser permanece por más tiempo en la superficie. Si se aumenta el tiempo de incidencia del láser se aumenta la temperatura, y a la vez que el láser se desplaza, la temperatura disminuye rápidamente, estos cambios en la fundición-solidificación permiten aumentar la densidad y consecuentemente la oposición a la penetración.

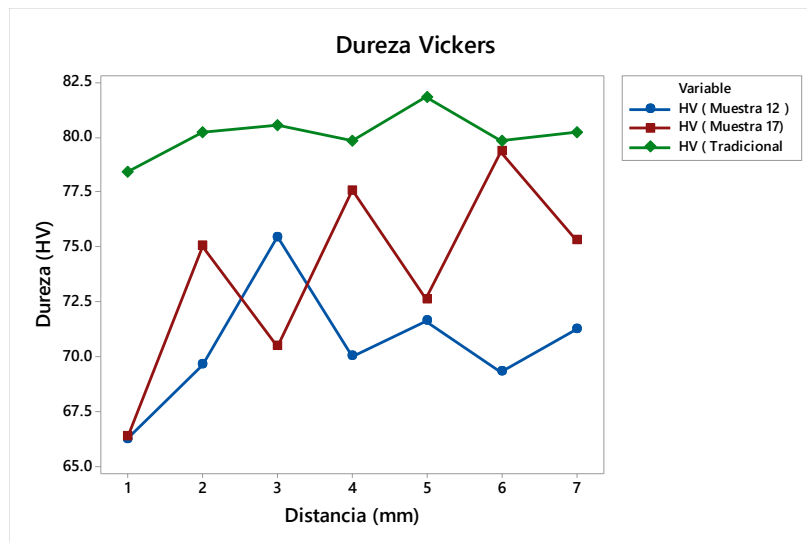


Figura 48. Comparativa dureza Vickers muestras 12 y 17 contra estándar.

4.7 Resultados de pruebas de fatiga.

Al realizar las pruebas para las muestras 12 y 17 bajo la norma ASTM E466-07 y los procedimientos internos del laboratorio el software de la máquina de fatiga mecánica arrojó los datos mostrados en la Tabla 10.

Designación	ϵ (mm/mm)	Numero de ciclos (N)	Half Life (N)	A (mm ²)
M12	0.0025	810	4500	122.148
M17	0.0033	1255	6000	121.951

Tabla 10. Datos obtenidos de las pruebas de fatiga para la muestra 12 y 17.

Se muestra el paso a paso de la muestra 17, que mostró mejor comportamiento debido a sus características; de cada prueba se obtiene la curva de histéresis en el ciclo de vida media debido a que en este punto la prueba se encuentra estabilizada. En la Figura 49, se puede observar una de las nueve gráficas para determinar el esfuerzo máximo (σ_{\max}) y esfuerzo mínimo (σ_{\min}) de la prueba y con las ecuaciones 4 y 5 se halla el esfuerzo promedio (σ_{prom}) y esfuerzo de amplitud (σ_a).

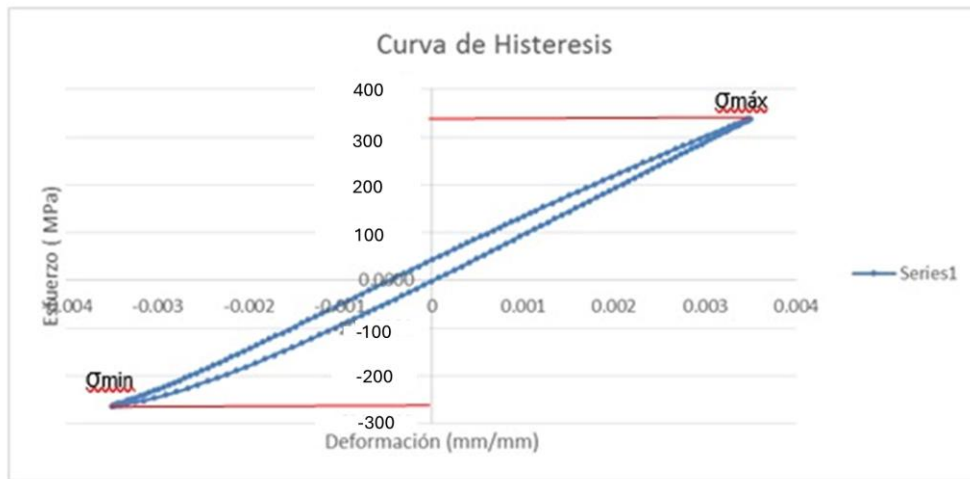


Figura 49. Curva de Histéresis Muestra 17 con deformación de 0.0035.

$$\sigma_{\text{prom}} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (5)$$

Después de obtener los datos de esfuerzo de amplitud se realizaron las gráficas para poder hallar las propiedades de vida de la fatiga del material de prueba.

En la Figura 50 podemos observar como de la curva Esfuerzo de amplitud Vs Numero de ciclos hallamos σ'_f , A y b. Este también se podría hallar por medio de la ecuación

$$\sigma'_f = A(2Nf)^b \quad (6)$$

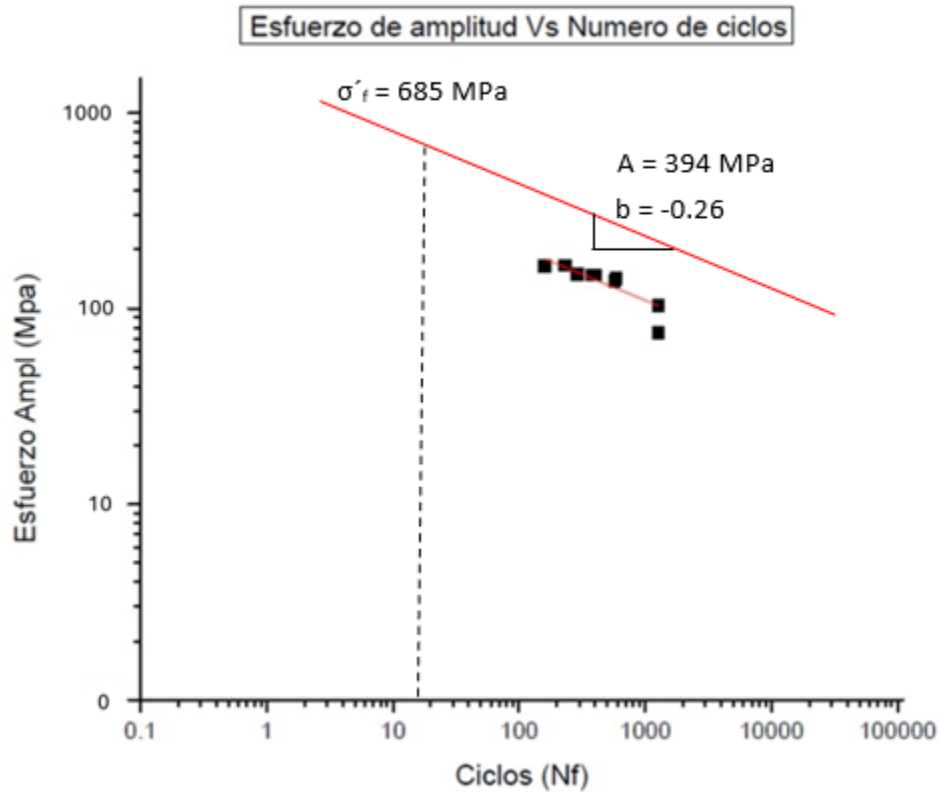


Figura 50. Grafica Esfuerzo Vs Numero de ciclos para hallar σ'_f , A y b de I.

En la Figura 51 se observa la gráfica Deformación plástica Vs Número de ciclos donde se halla ϵ'_f y el coeficiente c, la cual se representa por la siguiente ecuación

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (Nf)^c \quad (7)$$

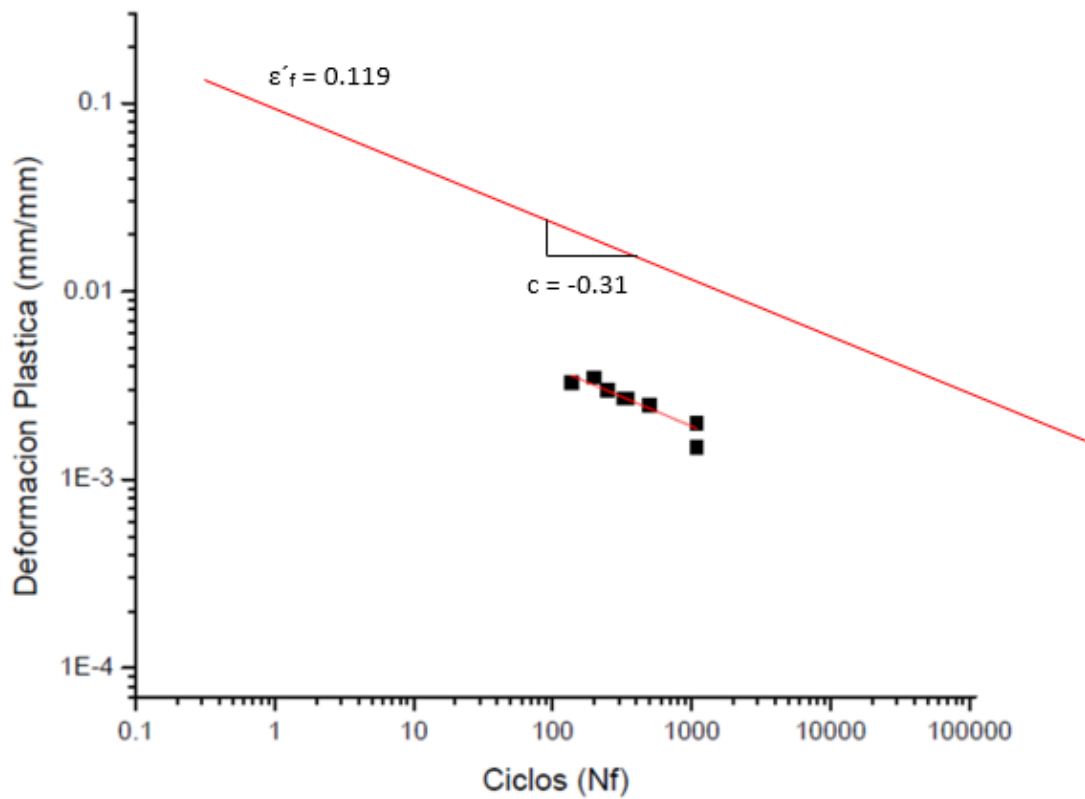


Figura 51. Gráfica Deformación plástica Vs Número de ciclos.

Una vez obtenidos todos los coeficientes, número de ciclos y resistencia a la fatiga, se realiza la gráfica Strain-Life (elástico-plástico), donde se encuentra la transición de vida a la fatiga, la cual se representa con las siguientes ecuaciones y la Figura 52.

$$\epsilon_a = \epsilon_L + \epsilon_p \quad (8)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_F)^b + \epsilon'_f (2N_F)^c \quad (9)$$

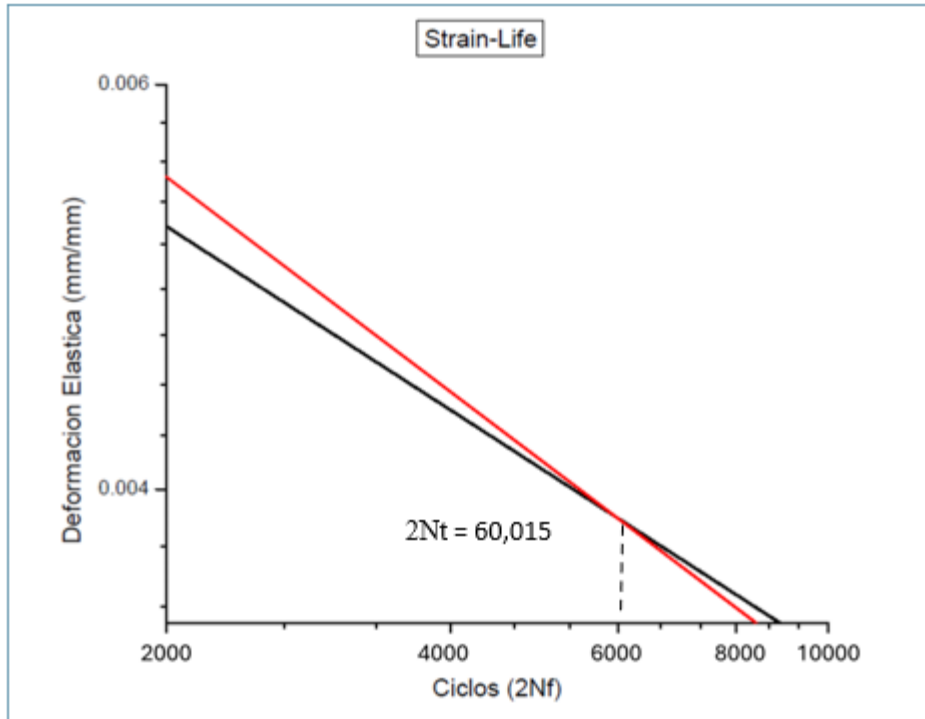


Figura 52. Curva Elástico - Plástico (Strain-Life) de la muestra 17.

En la figura 52 se presenta la curva S-N para la aleación AA6061 fabricada con SLM y construida en la dirección XY; se ensayaron a esfuerzo de fluencia alrededor de los de 170 MPa y 350 MPa y se rompió antes de alcanzar los 6000 de ciclos para la muestra 17 de AA6061 después de varios tratamientos térmicos y AA6061 fabricado y tratado térmicamente con la condición TT (T6); la muestra 17 también presenta un alargamiento más elevado, de hasta el 15%.

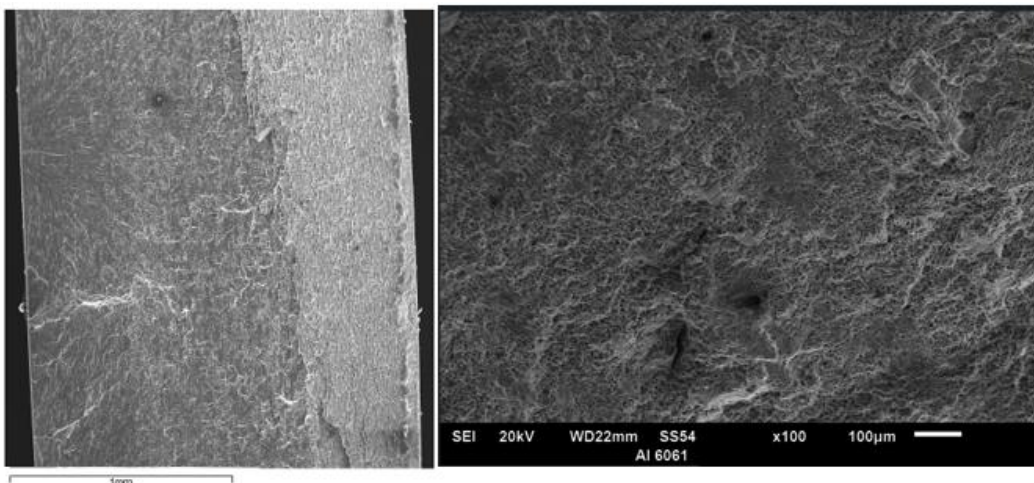


Figura 53. Fractografía del AA6061 cuando es sometido a fatiga.

Las fractografías de la Figura 53 corresponden a la fractura de la aleación de AA6061 con bajo número de ciclos. Esta fractura se inicia en el borde de la muestra y genera una fractura dúctil, este defecto probablemente se ocasionó en los poros de la interfase metal-óxido, que actúan como desencadenantes de la cohesión entre el metal y el óxido, dando lugar a grietas que favorecerían la rápida propagación de la fractura en el material.

Las superficies de fractura muestran principalmente características de fractura dúctil. Las superficies de fractura contienen crestas dúctiles, hoyuelos, y muestran una estructura tipo panal de abeja. En un pequeño porcentaje de todas las superficies de fractura se observa un pequeño porcentaje de planos frágiles. También se observan poros en partes de la estructura. La porosidad se ve influida por la potencia del láser, la velocidad de escaneo y la interacción entre la velocidad de escaneo y el espacio entre capas.

El presente estudio se ha centrado en la influencia de los parámetros del proceso SLM en la microestructura y las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas Al6061. El comportamiento mecánico de estas piezas a lo largo del rango de parámetros SLM seleccionados se investigó utilizando modelos de regresión DOE, los principales resultados y conclusiones se presentan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño de experimentos por el método de Taguchi se aplicó para llevar a cabo la optimización del proceso SLM en la aleación AA6061. El ensayo ANOVA se realizó para determinar los factores más influyentes en el proceso y el análisis de regresión fue llevado a cabo para determinar la ecuación de regresión lineal del modelo. Finalmente, las muestras con los parámetros optimizados se fabricaron y se validaron los resultados predichos. Las conclusiones más relevantes se resumen a continuación:

La morfología del polvo reveló que la aleación AA6061 posee una forma de partícula esférica intercaladas con microsátélites mostrando una discontinuidad considerable, después de realizar un tamizaje al polvo se eliminó gran parte de las micropartículas en forma de satélite y la PSD mostró una distribución sesgada dentro de un rango de 20 μm - 45 μm .

α -Al es la única fase en el polvo de AA6061 tal como viene de proveedor y en las muestras procesadas con SLM. La intensidad relativa del pico Bragg α -Al (200) de la muestra SLM es mucho mayor que la del polvo original, mientras que el pico β -Al (111) de la muestra SLM es más débil que la del polvo original, lo que indica la orientación preferente de la red latente del plano reticular (200) durante la solidificación del α -Al, debido a la solidificación preferente en la dirección $\langle 100 \rangle$.

El rango óptimo de densidad de energía al momento de la fabricación fue de 25–50 J/mm^3 , lo cual resultó en una densidad relativa de más de 99%, con un porcentaje de porosidad interna de 0.79%, 0.81% y 0.41%. Las tasas de densidad de energía que no están incluidas en el rango óptimo contribuyeron a la presencia de poros esféricos de hidrógeno.

Basados en los niveles usados en este estudio, las densidades más altas obtenidas se predijeron aproximadamente a 99.81%, correspondiendo con un espesor de capa de 70 μm , espacio entre capas de 0.1 mm, potencia de 350 W, velocidad de escaneo 550 mm/s, foco del láser 0 mm y patrón de escaneo 45° al igual que las microgrietas más pequeñas, que al compararlos con la densidad relativa del 98.3% de Zhang & Song et al, el 97% de Malena et al y el 98.9% de Wang, podemos deducir que si hubo un incremento de densidad relativa [24,47, 51].

En la aleación de aluminio AA6061 el incremento de la temperatura y velocidad, como acción dinámica, generó regiones de transformación de fases muy rápidas que fragilizaron el material, generando una disminución de la ductilidad del material y en la resistencia a la tensión. Al realizar el tratamiento térmico T6, se vio el aumento de resistencia a la tensión y mejora de la ductilidad del material, concluyendo que, para el material, a pesar de mejorar su densidad relativa y disminuir la cantidad de defectos, se

debe de realizar un postratamiento para mejorar propiedades, por la naturaleza del proceso.

Como una posibilidad para la reducción a la susceptibilidad al agrietamiento del AA6061 se propone una modificación al material por medio de micropartículas que aporten a reforzar la solución solidad en los espacios Interdendríticos, con los parámetros que incrementaron la densidad de energía es mayor a 99% y así mejorar las propiedades de tensión a elevadas temperaturas sin requerir un tratamiento térmico.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ghana KA, Mustafá SF. (2006) "Comparison between the products of four RPM systems for metals" *Rapid Prototyping Journal* Vol 12, No 2, pp 86-94
- [2] Rosochowski A, Matuszak A. "Rapid tooling: the state of the art" *Journal of Materials Processing Technology* Vol 106, No 1-3, pp. 191-198, (2000).
- [3] Delgado J, Contribución a la fundición selectiva por láser de pieza metálica mediante el estudio de propiedades mecánicas y de manufactura; Universitat de Girona; Gi. 993-2013.
- [4] Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Martinez E., Hernandez J., Amato K.N., Shindo P.W., Wicker R.B. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. (2012) *Journal of Materials Science and Technology*, 28 (1), pp. 1-14.
- [5] H. Zhang, H. Zhu, X. Nie, T. Qi, Z. Hu, X. Zeng, in: B. Gu, H. Helvajian, A. Pique (Eds.), *Fabrication and Heat Treatment of High Strength Al-Cu-Mg Alloy Processed Using Selective Laser Melting*, E-Publishing, Inc., San Francisco, 2016, pp. 97380X1-97380X7.
- [6] A. Balbás, M. Espinosa, M. Domínguez, "Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos", *Lámpsakos*, no. 19, pp 47-54, 2018.
- [7] Thijsa. L, Kempenb K, Kruthb J-P, Van Humbeecka J. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Mater* 2013, Pages 1809-1819.
- [8] Zhang J., Song B., Wei Q., Bourell D., Shi Y. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. (2019) *Journal of Materials Science and Technology*, 35 (2), pp. 270-284.
- [9] Handbook of Case. Handbook of case histories in failure analysis. ASM. Vol. 2, 1999.
- [10] ASTM. Determinación de la velocidad de propagación de fisuras en aleaciones de aluminio. Problemática encontrada en la aplicación de la norma ASTM E-647. *Mecánica de la Fractura*, Vol. 20. España. 2003.
- [11] Zhang J, Bo Song-, Zhang L, Liu J, Shi J; Selective laser melting of Al6061 alloy: Processing, microstructure, and mechanical properties; *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International*; 2018.
- [12] T. Wohlers and T. Caffrey, "Wohlers Report 2016. 3D printing and Additive Manufacturing. State of the industry," *Wohler Assoc.*, 2016.
- [13] "Introduction to Additive Manufacturing Technology. A guide for Designers and Engineers." Shrewsbury, UK., 2015.
- [14] J. Scott et al., "Additive Manufacturing: Status and Opportunities," in *Science and Technology Policy Institute*, 2012, pp. 1-29.
- [15] "Additive manufacturing: opportunities and constraints," *Royal Academy of Engineering*. UK, 2013. 8.
- [16] Y. Cadoret, V. Chastand, A. Tezenas, and W. Maia, "Additive Manufacturing in Thales." Paris, 2015.

- [17] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
- [18] International, A. (2013). F2792-12a-Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, 10-12. doi:10.1520/F2792-12A.2.
- [19] Almakky, M., Mahmoud, D. (2016) the importance of additive manufacturing processes in industrial applications. *Int. AMME Conference*, 17, 1-14.
- [20] M. Aliakbari, "Additive Manufacturing: state of the art, capabilities and sample applications with cost analysis." PhD thesis, KTH, 2012.
- [21] A. Biamino, S., Penna, "Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation." *Intermetallics*, vol. 19, p. 776, 2011.
- [22] C. Yang, Y.J. Zhao, L.M. Kang, D.D. Li, W.W. Zhang, L.C. Zhang, High-strength silicon brass manufactured by selective laser melting, *Mater. Lett.* 210 (2018) 169-172.].
- [23] K.G. Prashanth, S. Scudino, J. Eckert, Defining the tensile properties of Al-12Si parts produced by selective laser melting, *Acta Mater.* 126 (2017) 25-35.
- [24] P. Wang, H.C. Li, K.G. Prashanth, J. Eckert, S. Scudino, Selective laser melting of Al-Zn-Mg-Cu: Heat treatment, microstructure and mechanical properties, *J. Alloys Compd.* 707 (2017) 287-290.].
- [25] A.M. Mancisidor, J.B. González, F. Garcíandia, P. Álvarez, "Estudio de los factores críticos que afectan a la calidad de las piezas fabricadas por SLM" IK4-Lortek16/06/2015.
- [26] J. Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy "Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications, Hardcover;" ISBN: 978-0-87170-803-8. [7] ASM International 1994.
- [27] Irausquín. I.A. "Comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con TiN". Universidad Central de Venezuela. Caracas, mayo de 2003.
- [28] ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. J. R. Davies (Ed.), the Materials Information Society, Metals Park, USA.
- [29] C. Jaramillo Isaza, "Estudio de corrosión asistida por esfuerzo en aleaciones y superaleaciones para aplicaciones aeronáuticas", UANL, CIIIA, 2016.
- [30] M.L Bun Leal; "Caracterización de fallas en estructuras delgadas manufacturadas aditivamente mediante fusión selectiva láser. UANL, CIIIA, 2019.
- [31] Aboulkhair, N.T., Simonelli, M., Parry, L., Aschcroft, I., Tuck, C., Hague, R. (2019). 3D printing of Aluminum alloys: Additive Manufacturing of Aluminum alloys using selective laser melting. *Progress in Materials Science*, 1-45.
- [32] Ghany K.A, Mustafa S.F. (2006) "Comparison between the products of four RPM systems for metals" *Rapid Prototyping Journal* Vol 12, No 2, pp 86-94
- [33] Rosochowski A, Matuszak A. "Rapid tooling: the state of the art" *Journal of Materials Processing Technology* Vol 106, No 1-3, pp. 191-198, 2000.
- [34] Delgado J, Contribución a la fundición selectiva por láser de pieza metálica mediante el estudio de propiedades mecánicas y de manufactura; Universitat de Girona; Gi. 993-2013.
- [35] Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Martinez E., Hernandez J., Amato K.N., Shindo P.W., Wicker R.B. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. (2012) *Journal of Materials Science and Technology*, 28 (1), pp. 1-14.

- [36] Zhang H., Zhu H., Nie X., Qi T., Hu Z., Zeng X., Fabrication and Heat Treatment of High Strength Al-Cu-Mg Alloy Processed Using Selective Laser Melting, E-Publishing, Inc., San Francisco, 2016, pp. 97380X1-97380X7.
- [37] A. Balbás, M. Espinosa, M. Dominguez, “Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos”, Lámpsakos, no. 19, pp 47-54, 2018.
- [38] Thijs. L, Kempen K, Kruth J.P, Van Humbeeck J. Fine-structured aluminum products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia* Volume 61, Issue 5, March 2013, Pages 1809-1819 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.052>
- [39] Zhang J., Song B., Wei Q., Bourell D., Shi Y. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. (2019) *Journal of Materials Science and Technology*, Volume 35, Issue 2, February 2019, Pages 270-284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.004>
- [40] Handbook of Case. Handbook of case histories in failure analysis. ASM. Vol. 2, 1999.
- [41] ASTM. Determinación de la velocidad de propagación de fisuras en aleaciones de aluminio. Problemática encontrada en la aplicación de la norma ASTM E-647. *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 20. España. 2003.
- [42] Zhang J, Song B., Zhang L, Liu J, Shi Y. Selective laser melting of Al6061 alloy: Processing, microstructure, and mechanical properties. *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International*; pp 1253-1261. 2018.
- [43] Wholers T. and Caffrey T., “Wohlers Report 2016. 3D printing and Additive Manufacturing. State of the industry,” Wohler Assoc., 2016.
- [44] Bisht M., Ray N., Verbist F., Coeck S. Correlation of selective laser melting-melt pool events with the tensile properties of Ti-6Al-4V ELI processed by laser powder bed fusion. (2018) *Additive Manufacturing*, Volume 22, August 2018, Pages 302-306 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.004>
- [45] Ahmed H. M, Yi F.X, Mohamed A.E., and Stephen C.V. The Effect of Selective Laser Melting Process parameters on the Microstructure and Mechanical properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys, *Addit. Manuf.* 2018.
- [46] Aboulkhair, N.T.; Everitt, N.M.; Ashcroft, I.; Tuck, C. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. Volumes 1–4, October 2014, Pages 77-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- [47] Ley M., Bermúdez-Reyes B., López-Botello O.E. “Caracterización de fallas en estructuras delgadas manufacturadas aditivamente mediante fusión selectiva láser”; Universidad Autonoma de Nuevo León; 2019.
- [48] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, Volume 117, 15 September 2016, Pages 371-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019> [18]
- [49] Delgado J, Contribución a la fundición selectiva por láser de pieza metálica mediante el estudio de propiedades mecánicas y de manufactura; Universitat de Girona; Gi. 993-2013
- [50] Kusoglu I.M., Gökce B., Barcikowski S. Research trends in laser powder bed fusion of Al alloys within the last decade. *Additive Manufacturing*. Volume 36, December 2020, 101489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101489>

- [51] Maamoun A.H., Xue Y.F., Elbestawi M. A. and Veldhuis S.C. Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness and Dimensional Accuracy. *Materials* 2018, 11(12), 2343. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11122343>
- [52] Mehta A., Zhou L., Huynh T., Park S., Hyer H., Song S., Bai Y., Imholte D.D., Woolstenhulme N.E., Wachs D.M., Sohn Y. "Additive Manufacturing and Mechanical properties of the dense and crack free Zr modified Aluminum Alloy 6061 fabricated by the Laser-Powder Bed Fusion". *Additive Manufacturing*. volume 41, May 2021, 101966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101966>
- [53] Kaibyshev R., Musin F., *, Gromov D., Nieh T. G., Lesuer D.R. Effect of Cu and Zr Additions on the Superplastic Behavior of 6061 Aluminum Alloy. *Materials Transactions*, Vol. 43, Issue 10 pp. 2392 - 2399, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.2392>
- [54] Pérez Bartolomé G., Análisis Microestructural y Micromecánico de una Aleación AlSi10Mg Fabricada por SLM. Trabajo final de maestría. Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [55] Ibbett J., Tafazzolimoghaddam B., Hernandez-Delgadillo H., and Curiel-Sosa J.L. What triggers a microcrack in printed engineering parts produced by selective laser sintering on the first place *Materials and Design*, Volume 88, 25 December 2015, Pages 588-597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.026>
- [56] Zavala-Arredondo M., London T., Allen M., Maccio, T., Ward S., Griffiths D., Allison A., Goodwin P. Hauser C. Use of power factor and specific point energy as design parameters in laser powder-bed-fusion (L-PBF) of AlSi10Mg alloy. *Materials and Design*. Volume 182, 15 November 2019, 108018
- [57] Seabra M, Azevedo J., Araújo A., Reis L., Pinto E., Alves N, Santos R., Mortágua J.P. Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components, *Procedia Structural Integrity*, Volume 1, 2016, Pages 289-296 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.039>
- [58] Zhang Q., Xie J., Gao Z., London T., Griffiths D., Oancea V. A metallurgical phase transformation framework applied to SLM additive manufacturing processes. *Materials and Design*. Volume 166, 15 March 2019, 107618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107618>
- [59] Read N., Wang W., Essa K., Attallah M. M. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimization and mechanical properties development.
- [60] 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.
- [61] *Materials and Design*. Volume 65, January 2015, Pages 417-424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.044>
- [62] ISO/ASTM 52907:2019. Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metal powders. 2019.
- [63] Handbook of Case. Handbook of case histories in failure analysis. ASM. Vol. 2, 1999.
- [64] Maamoun, A.H.; Elbestawi, M.; Dosbaeva, G.K.; Veldhuis, S.C. Thermal Post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder. *Addit. Manuf.* 2018, 21, 234–247.

- [65] Aboulkhair NT, Everitt NM, Maskery I, Ashcroft I, Tuck C. Selective laser melting of aluminum alloys. *MRS Bull* 2017; 42:311–9.
- [66] Louvis E, Fox P, Sutcliffe CJ. Selective laser melting of aluminium components. *J Mater Process Technol* 2011; 211:275–84.
- [67] Dadbakhsh S, Mertens R, Vanmeensel K, Vleugels J, Humbeeck JV, Kruth J-P. In situ alloying and reinforcing of Al6061 during selective laser melting. *Proc CIRP* 2018; 74:39–43.
- [68] Martin JH, Yahata BD, Hundley JM, Mayer JA, Schaedler TA, Pollock TM. 3D printing of high-strength aluminium alloys. *Nature* 2017; 549:365.
- [69] Kaufmann N, Imran M, Wischeropp TM, Emmelmann C, Siddique S, Walther F. Influence of process parameters on the quality of aluminium alloy EN AW 7075 using selective laser melting (SLM). *Phys Proc* 2016; 83:918–26.
- [70] Prashanth, K.G. Selective Laser Melting of Al-12Si. Ph.D. Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 26 May 2014.
- [71] Badeshia, H.K.D.H. "Thermal analyses techniques. Differential thermal analysis". University of Cambridge, Material Science and Metallurgy

ANEXOS

Difusión del trabajo de investigación.

- Presentación Oral “Optimization of manufacturing parameters by selective laser melting in pieces AA6061”. Congreso Internacional de materiales XXIX IMRC agosto 15, 2021.
- Presentación Oral “Correlation of energy density and power factor in the densification mechanism of AA6061 fabricated by selective laser melting”. Congreso Internacional de materiales XXX IMRC Agosto 14, 2022.
- Conferencia magistral. “Propiedades mecánicas en la manufactura aditiva”. Programa Mujeres en la ciencia 2022, Escuela Técnica Roberto Rocca Pesquería. 9 de marzo 2022.
- Curso de prototipado rápido. “Teoría e implementación del proceso de manufactura aditiva”. Escuela Secundaria Tec. 73 German Gedovius Huerta. Abril 2022.
- Artículo científico. C. Jaramillo-Isaza, O. Higuera-Cobos, J. Taborda-Ríos, O. Lopez-Botello, P. Zambrano-Robledo, Correlation of energy density and manufacturing variables of AA6061 through laser powder bed fusion and its effect on the densification mechanism, Metals 13 (2023) 1904, <https://doi.org/10.3390/met13111904>

Datos muestra de tensión

CycleCount	Ch 1 Displacement	Ch 1 Force	Ch 1 Strain	Running Tim	Ch 1 Segmen	Fuerza	Esfuerzo
CycleCount	mm	kN	mm/mm	sec	cycles	N	Mpa
1	-0.001117587	0.01917826	4.31E-06	5.20800781	1	19.1782608	0.1506
1	-0.002548099	0.00952231	-2.15E-07	5.21777344	1	9.5223074	0.0778
1	-0.000959635	0.00342913	1.75E-07	5.22753906	1	3.4291296	0.0269
1	-0.001701713	0.00589155	1.36E-06	5.23730469	1	5.89154673	0.0481
1	-0.002291799	0.02332916	3.75E-07	5.24707031	1	23.3291645	0.1832
1	-0.000247359	0.05470216	2.55E-06	5.25683594	1	54.7021637	0.4469
1	0.000554323	0.09459351	4.26E-06	5.26660156	1	94.5935059	0.7429
1	-0.000274181	0.16621919	5.09E-06	5.27636719	1	166.219193	1.3581
1	0.001040101	0.24947617	9.62E-06	5.28613281	1	249.476166	1.9593
1	0.002706051	0.3585564	1.46E-05	5.29589844	1	358.556396	2.9296
1	0.004008412	0.49271295	2.15E-05	5.30566406	1	492.712952	3.8695
1	0.006654859	0.64628339	2.73E-05	5.31542969	1	646.283386	5.2805
1	0.006899238	0.8240426	3.43E-05	5.32519531	1	824.042603	6.4716
1	0.008565187	1.02491577	3.96E-05	5.33496094	1	1024.91577	8.3742
1	0.012993813	1.26911743	5.35E-05	5.34472656	1	1269.11743	9.9670
1	0.01399219	1.53667712	6.14E-05	5.35449219	1	1536.67712	12.5556
1	0.017115473	1.81380151	7.27E-05	5.36425781	1	1813.80151	14.2447
1	0.019347668	2.12459229	8.64E-05	5.37402344	1	2124.59229	17.3592
1	0.024434925	2.44905518	9.98E-05	5.38378906	1	2449.05518	19.2337
1	0.027835369	2.80594678	1.14E-04	5.39355469	1	2805.94678	22.9263
1	0.0323534	3.17720898	1.34E-04	5.40332031	1	3177.20898	24.9523
1	0.033789875	3.58136084	1.45E-04	5.41308594	1	3581.36084	29.2619
1	0.040411949	4.00061548	1.66E-04	5.42285156	1	4000.61548	31.4189
1	0.044655801	4.44874365	1.78E-04	5.43261719	1	4448.74365	36.3489
1	0.047183035	4.92012842	2.00E-04	5.44238281	1	4920.12842	38.6403
1	0.053480268	5.40682715	2.21E-04	5.45214844	1	5406.82715	44.1770
1	0.05902052	5.90720459	2.36E-04	5.46191406	1	5907.20459	46.3924
1	0.064393877	6.41575586	2.61E-04	5.47167969	1	6415.75586	52.4206
1	0.069162248	6.94704785	2.83E-04	5.48144531	1	6947.04785	54.5588
1	0.076204538	7.5100166	3.04E-04	5.49121094	1	7510.0166	61.3614
1	0.081676248	8.10014746	3.34E-04	5.50097656	1	8100.14746	63.6147
1	0.087091328	8.69572168	3.53E-04	5.51074219	1	8695.72168	71.0493
1	0.094348194	9.30805762	3.80E-04	5.52050781	1	9308.05762	73.1010
1	0.101673606	9.94461621	0.00040698	5.53027344	1	9944.61621	81.2535
1	0.106760861	10.5949023	0.00043494	5.54003906	1	10594.9023	83.2073
1	0.113797185	11.250459	0.00045959	5.54980469	1	11250.459	91.9230
1	0.119993092	11.9100557	0.00048292	5.55957031	1	11910.0557	93.5359
1	0.127726787	12.5863213	0.00051347	5.56933594	1	12586.3213	102.8378
1	0.134468079	13.2743984	0.00053989	5.57910156	1	13274.3984	104.2508
1	0.1420021	13.9736768	0.00056785	5.58886719	1	13973.6768	114.1734
1	0.149530169	14.6857441	0.00060311	5.59863281	1	14685.7441	115.3348
1	0.155022746	15.3933125	0.00062942	5.60839844	1	15393.3125	125.7726
1	0.164335972	16.1258809	0.00065902	5.61816406	1	16125.8809	126.6450
1	0.17265082	16.8730703	0.00069246	5.62792969	1	16873.0703	137.8631
1	0.179466602	17.6330762	0.0007183	5.63769531	1	17633.0762	138.4818
1	0.186941033	18.3993223	0.00075132	5.64746094	1	18399.3223	150.3335
1	0.196912879	19.1681777	0.00078488	5.65722656	1	19168.1777	150.5377
1	0.20413399	19.950623	0.00081749	5.66699219	1	19950.623	163.0086
1	0.21225214	20.7325352	0.00084781	5.67675781	1	20732.5352	162.8234
1	0.221064693	21.5178301	0.0008791	5.68652344	1	21517.8301	175.8136
1	0.230199104	22.3049316	0.00091488	5.69628906	1	22304.9316	175.1723
1	0.237321859	23.1055469	0.00094465	5.70605469	1	23105.5469	188.7862
1	0.247484451	23.9113848	0.000976	5.71582031	1	23911.3848	187.7886
1	0.256690371	24.7250234	0.00100999	5.72558594	1	24725.0234	202.0183
1	0.264835369	25.5498906	0.00104134	5.73535156	1	25549.8906	200.6566
1	0.273171056	26.3486465	0.0010732	5.74511719	1	26348.6465	215.2843
1	0.281938905	27.1170605	0.00110316	5.75488281	1	27117.0605	212.9644
1	0.289973628	27.8468223	0.00113194	5.76464844	1	27846.8223	227.5253
1	0.298115599	28.5448262	0.00115881	5.77441406	1	28544.8262	224.1774
1	0.3036946	29.1953809	0.00118674	5.78417969	1	29195.3809	238.5438
1	0.31288265	29.8149961	0.00120815	5.79394531	1	29814.9961	234.1527
1	0.319525599	30.3893594	0.00123379	5.80371094	1	30389.3594	248.2994
1	0.326088077	30.9279453	0.00125729	5.81347656	1	30927.9453	242.8933
1	0.330346811	31.4377227	0.00128032	5.82324219	1	31437.7227	256.8651

Datos muestra de fatiga

Ch 1 Force kN	Ch 1 Strain mm/mm	Running Tim sec	Ch 1 Segmer cycles	Fuerza N	Esfuerzo Mpa
6.43144873	-0.000904424	39998.4922	19999	6431.44873	53.5303
7.87600049	-0.000843495	39998.5039	19999	7876.00049	65.5536
9.3196709	-0.000785124	39998.5117	19999	9319.6709	77.5695
10.7579414	-0.000728451	39998.5234	19999	10757.9414	89.5406
12.1709541	-0.00066882	39998.5313	19999	12170.9541	101.3014
13.587877	-0.000610503	39998.543	19999	13587.877	113.0947
14.9796025	-0.000551642	39998.5508	19999	14979.6025	124.6783
16.3627549	-0.000493402	39998.5625	19999	16362.7549	136.1906
17.7289297	-0.000434513	39998.5703	19999	17728.9297	147.5615
19.0699824	-0.000376631	39998.582	19999	19069.9824	158.7234
20.3972422	-0.000323811	39998.5898	19999	20397.2422	169.7705
21.7144023	-0.00026979	39998.6016	19999	21714.4023	180.7335
23.0287949	-0.000213052	39998.6094	19999	23028.7949	191.6734
24.3326777	-0.000160421	39998.6211	19999	24332.6777	202.5259
25.5993867	-0.000104433	39998.6289	19999	25599.3867	213.0690
26.8241621	-5.32E-05	39998.6406	19999	26824.1621	223.2630
28.0772969	-2.82E-07	39998.6484	19999	28077.2969	233.6931
29.5714629	6.12E-05	39998.6602	19999	29571.4629	246.1294
31.2582617	0.000129083	39998.668	19999	31258.2617	260.1690
32.924	0.000199813	39998.6797	19999	32924	274.0333
34.5921055	0.000268114	39998.6875	19999	34592.1055	287.9172
36.2500156	0.00034204	39998.6992	19999	36250.0156	301.7164
37.9120742	0.000411328	39998.707	19999	37912.0742	315.5500
39.5806172	0.0004771	39998.7188	19999	39580.6172	329.4377
41.2439492	0.000545986	39998.7266	19999	41243.9492	343.2819
42.9010391	0.000615385	39998.7383	19999	42901.0391	357.0742
44.5464961	0.000686604	39998.7461	19999	44546.4961	370.7697
46.1716328	0.000754781	39998.7578	19999	46171.6328	384.2960
47.782207	0.000820688	39998.7656	19999	47782.207	397.7012
49.4014102	0.000889586	39998.7773	19999	49401.4102	411.1782
51.0106172	0.00096082	39998.7852	19999	51010.6172	424.5719
52.6056953	0.001024353	39998.7969	19999	52605.6953	437.8481
54.1954727	0.001091271	39998.8047	19999	54195.4727	451.0801
55.7850625	0.001159935	39998.8164	19999	55785.0625	464.3106
57.3675625	0.001223952	39998.8242	19999	57367.5625	477.4821
58.9572461	0.001291999	39998.8359	19999	58957.2461	490.7133
60.534875	0.001357219	39998.8438	19999	60534.875	503.8443
62.1109375	0.001428045	39998.8555	19999	62110.9375	516.9622
63.6869297	0.001491627	39998.8633	19999	63686.9297	530.0795
65.2532734	0.001555721	39998.875	19999	65253.2734	543.1165
66.8119219	0.001624085	39998.8828	19999	66811.9219	556.0894
68.3826484	0.001690283	39998.8945	19999	68382.6484	569.1629
69.9426875	0.001754179	39998.9023	19999	69942.6875	582.1474
71.4959766	0.001815298	39998.9141	19999	71495.9766	595.0758
73.0520859	0.001886314	39998.9219	19999	73052.0859	608.0276
74.6227578	0.001953034	39998.9336	19999	74622.7578	621.1006
76.1933125	0.002017261	39998.9414	19999	76193.3125	634.1727
77.7534219	0.002083712	39998.9531	19999	77753.4219	647.1578
79.3120781	0.002148868	39998.9609	19999	79312.0781	660.1308
80.8830859	0.002210866	39998.9727	19999	80883.0859	673.2066
82.4614922	0.00228126	39998.9805	19999	82461.4922	686.3440
84.0301406	0.002352066	39998.9922	19999	84030.1406	699.4002
85.5719688	0.002416355	39999	19999	85571.9688	712.2332
86.9225859	0.002476803	39999.0117	19999	86922.5859	723.4747
88.0901016	0.002525136	39999.0195	19999	88090.1016	733.1921
89.0961406	0.002567168	39999.0313	19999	89096.1406	741.5656
89.9331094	0.002600918	39999.0391	19999	89933.1094	748.5319
90.6181406	0.002631956	39999.0508	19999	90618.1406	754.2335
91.1551484	0.002656966	39999.0586	19999	91155.1484	758.7031
91.5648438	0.002674097	39999.0703	19999	91564.8438	762.1131
91.8453359	0.002686403	39999.0781	19999	91845.3359	764.4477
92.0337656	0.002692756	39999.0898	19999	92033.7656	766.0161
92.1161641	0.002697157	39999.0977	19999	92116.1641	766.7019
92.1021797	0.002699799	39999.1094	19999	92102.1797	766.5855
92.0052813	0.002693336	39999.1172	19999	92005.2813	765.7790
91.8109844	0.002686003	39999.1289	19999	91810.9844	764.1618
91.5245547	0.002673557	39999.1367	19999	91524.5547	761.7778
91.1701563	0.002660407	39999.1484	19999	91170.1563	758.8281
90.7435781	0.002639152	39999.1563	19999	90743.5781	755.2776
90.2458984	0.002616246	39999.168	19999	90245.8984	751.1353
89.6942734	0.002592892	39999.1758	19999	89694.2734	746.5440
89.0714766	0.002566507	39999.1875	19999	89071.4766	741.3603
88.3932891	0.002538812	39999.1953	19999	88393.2891	735.7156
87.664	0.002507404	39999.207	19999	87664	729.6456
86.8865547	0.002473084	39999.2148	19999	86886.5547	723.1748
86.0530938	0.002437147	39999.2266	19999	86053.0938	716.2377
85.1649844	0.002401946	39999.2344	19999	85164.9844	708.8458
84.2291172	0.002356605	39999.2461	19999	84229.1172	701.0564
83.2807188	0.002321547	39999.2539	19999	83280.7188	693.1626
82.2661328	0.002275109	39999.2656	19999	82266.1328	684.7180
81.2244766	0.002227027	39999.2734	19999	81224.4766	676.0481
80.1668672	0.002186465	39999.2852	19999	80166.8672	667.2454
79.0751484	0.002140474	39999.293	19999	79075.1484	658.1588
77.9384297	0.002093989	39999.3047	19999	77938.4297	648.6977