

Estado del Arte Sobre los Métodos de Manufactura Aditiva Utilizados para la Fabricación de
Componentes Metálicos

Diego Andrés Perdomo Rojas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla

Codirector

Darío Yesid Peña Ballesteros

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Los Materiales

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Por encima de todo, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, quien me ha dado la vida, la fuerza y las oportunidades para superar cada desafío en mi camino. Este logro no sería posible sin Su guía y protección constante. Agradezco de corazón a mis padres, quienes han sido mi mayor apoyo durante toda mi carrera universitaria. Su amor, sacrificio y respaldo incondicional me han permitido alcanzar este importante objetivo en mi vida. Su confianza en mí ha sido la motivación más grande para seguir adelante. Quiero extender mi gratitud al profesor Carlos Andrés Galán pinilla, quien me brindó la oportunidad de realizar este trabajo de grado bajo su guía. Su apoyo, paciencia y experiencia fueron fundamentales en este proceso, ayudándome a crecer como estudiante y como profesional.

A la Universidad Industrial de Santander y, en particular, a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, les agradezco por formarme como profesional, proporcionándome no solo las herramientas académicas necesarias, sino también valores y habilidades que llevaré conmigo a lo largo de mi vida. Agradezco profundamente a todos los profesores que me formaron durante estos años. Cada lección impartida, cada consejo compartido y cada desafío planteado fueron piezas clave para adquirir los conocimientos necesarios no solo para este trabajo de investigación, sino también para desempeñarme en el futuro como un profesional competente. No puedo olvidar el valioso apoyo de los técnicos de laboratorio: Javier, Óscar, César, Sergio y, especialmente, Mario. Siempre estuvieron dispuestos a brindarme su ayuda y conocimiento cuando más lo necesite, demostrando su compromiso y profesionalismo.

Finalmente, agradezco a cada persona que, de una u otra manera, aportó su granito de arena para que este trabajo de grado fuera posible. Cada gesto de apoyo, aliento o colaboración ha

sido invaluable en este camino, y les estaré eternamente agradecidos. Este logro es el reflejo del esfuerzo conjunto de todos aquellos que creyeron en mí. Agradezco el apoyo brindado por el proyecto “ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS METODOS DE MANUFACTURA ADITIVA UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES METÁLICOS”. Su respaldo fue fundamental para el desarrollo de este trabajo de grado.

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Introducción	11
1.1 Contexto y Justificación.....	11
1.2. Descripción del Problema.....	12
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. Metodología	16
3.1 Búsqueda de la Información	16
3.2 Organización de la Información.....	17
3.3 Estudio de las Características de la Manufactura Aditiva.....	17
3.4 Identificación de las Diferencias de la Microestructura de las Piezas Obtenidas por Manufactura	19
4. Resultados.....	20
4.1. Búsqueda de la Información	20
4.2 Organización de la Información.....	20
4.3 Estudio de las Características de la Manufactura Aditiva.....	22
4.3.1. Manufactura Aditiva.....	22
4.3.2. Fabricación Aditiva Basada en Polvos.....	23
4.3.3. Fusión por Haz de Electrones (EBM).....	24
4.3.4. Avances en las Técnicas de Fabricación Aditiva.....	25

4.3.5. Comparación de las Distintas Metodologías Analizadas..... 28

4.3.6. Aplicaciones Industriales..... 30

4.3.7. Tendencias Futuras y Oportunidades de Mejora en la Manufactura Aditiva 31

4.4. Identificación de las Diferencias de la Microestructura de las Piezas Obtenidas por
Manufactura 33

4.4.1. Parámetros Clave en la Formación de Microestructuras 33

4.4.2. Microestructura del Inconel 718: AM vs. Colada..... 35

4.4.3. Microestructura del Ti-6Al-4V en Manufactura Aditiva vs. Colada Tradicional..... 35

4.4.4. Acero de herramienta..... 36

5. Conclusiones..... 38

6. Recomendaciones..... 39

Referencias Bibliográficas..... 40

Apéndice 46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Comparación de Diversas Técnicas De Manufactura Aditiva</i>	27
Tabla 2 <i>Microestructura de piezas obtenidas mediante MA</i>	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Metodología del Estudio</i>	16
Figura 2 <i>Tipo de Documento Analizado en el Estudio</i>	21
Figura 3 <i>Subcategorías de Análisis en la Revisión Bibliográfica</i>	22
Figura 4 <i>Fusión de Lecho de Polvo</i>	24
Figura 5 <i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	25

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A <i>Ejemplo Cuadro de Síntesis de Documentos MA</i>	46

Resumen

Título: Estado del Arte Sobre los Métodos de Manufactura Aditiva Utilizados para la Fabricación de Componentes Metálicos*

Autor: Diego Andres Perdomo Rojas**

Palabras Clave: Manufactura Aditiva; Métodos de Manufactura, Propiedades Metálicas.

La Manufactura aditiva (AM) ha surgido como una tecnología transformadora en la industria moderna, permitiendo la creación de componentes metálicos con geometrías complejas, reducción de costos y tiempos de producción, Sin embargo, su adopción masiva enfrenta desafíos técnicos y de optimización, justificando la necesidad de un estudio sobre los métodos de MA aplicados a metales en la actualidad. El presente estudio se enfoca en analizar el estado del arte de las técnicas de AM, con el objetivo de identificar sus ventajas, limitaciones y aplicaciones industriales, así como de la microestructura de las piezas obtenidas. Los resultados evidencian que la MA se perfila como una tecnología transformadora con capacidad para producir componentes con microestructuras controladas y propiedades mejoradas. En comparación con la colada tradicional la AM resalta ventajas en precisión y resistencia, aunque aún enfrenta retos en ductilidad de los componentes metálicos fabricados mediante AM en comparación a los tradicionales y la estandarización de los mismo; los avances en procesos, monitoreo y materiales consolidan su aplicación en sectores clave, lo que permite percibir el crecimiento de estas tecnologías en un periodo de tiempo cercano.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Metales. Programa académico: Ingeniería Metalúrgica. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. Tít. Codirector: Darío Yesid Peña Ballesteros

Abstract

Title: State of the Art on Addictive Manufacturing Methods Used for the Manufacture of Metal Components**

Author(s): Diego Andrés Perdomo Rojas **

Key Words: Addictive Manufacturing; Manufacturing Methods, Metallic Properties.

Additive manufacturing (AM) has emerged as a transformative technology in modern industry, enabling the creation of metal components with complex geometries, reducing costs and production times. However, its widespread adoption faces technical and optimization challenges, justifying the need for a study of AM methods currently applied to metals. This study focuses on analyzing the state-of-the-art of AM techniques, with the aim of identifying their advantages, limitations and industrial applications, as well as the microstructure of the obtained parts. The results show that AM is emerging as a transformative technology capable of producing components with controlled microstructures and improved properties. Compared to traditional casting, AM highlights advantages in precision and strength, although it still faces challenges in the ductility of metallic components manufactured using AM compared to traditional ones and their standardization. Advances in processes, monitoring and materials consolidate its application in key sectors, which allows us to perceive the growth of these technologies in the near future.

* Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Metals Science. Academic Program: Metallurgical Engineering. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. Co-director: Darío Yesid Peña Ballesteros.

1. Introducción

1.1 Contexto y Justificación

Debido a los diferentes avances en la tecnología y en la industria de la fabricación de piezas metálicas con formas geométricas específicas y los métodos de AM para construir estos componentes; el presente estudio se justifica por su relevancia en los ámbitos tecnológico, social y de innovación, dado que la fabricación aditiva de metales (AM) ha emergido como una tecnología disruptiva con el potencial de transformar la industria moderna (Langfeld, 2019). Teniendo en cuenta esta consideración se evidencia que la fabricación aditiva de metales muestra un avance significativo en la producción de componentes con geometrías complejas que serían difíciles o costosas de fabricar mediante métodos tradicionales. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, como la reducción de desperdicio de material y la capacidad de producir piezas personalizadas, la AM enfrenta desafíos técnicos, como la optimización de las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas y la eliminación de defectos como porosidad, faltas de fusión y tensiones residuales (Martínez, 2020).

Se reconoce, además, que la fabricación aditiva de metales tiene un impacto social significativo al promover el desarrollo de tecnologías sostenibles que reducen el desperdicio de material y reducen el impacto ambiental; debido a que en un contexto global donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son prioridades; la AM ofrece una alternativa más ecológica frente a los métodos de fabricación tradicionales, que suelen generar grandes cantidades de desechos (Pérez, 2024). Autores como Monar & Freire (2024) expone que esta tecnología tiene aplicaciones en sectores críticos como el médico, donde permite la fabricación de implantes personalizados y prótesis adaptadas a las necesidades específicas de los pacientes, mejorando su

calidad de vida. Al analizar los avances en la AM, este estudio no solo contribuye al desarrollo de tecnologías más eficientes, sino que también promueve soluciones que benefician directamente a la sociedad.

Además, al explorar aplicaciones industriales concretas y casos de éxito, en cuanto a que esta forma de producción de componentes produce microestructuras nuevas, asociadas a grandes velocidades de enfriamiento, fusión localizada, granos columnares y formación de precipitados que no se producen en los procesos convencionales. Por ende, este estudio busca inspirar nuevas ideas y enfoques que impulsen la innovación en el sector; la capacidad de la AM para producir piezas con geometrías complejas y propiedades mejoradas abre oportunidades para el diseño de productos más eficientes y funcionales, lo que puede transformar la forma en que se fabrican los componentes en diversas industrias; pudiendo decir que la fabricación aditiva no solo es una tecnología, sino una revolución en la forma en que diseñamos y producimos.

1.2. Descripción del Problema

La fabricación mediante manufactura aditiva de metales, también conocida como *Additive Manufacturing* (AM) por sus siglas en inglés, esta revolucionado la industria manufacturera a nivel global. Autores como Álvarez *et al.* (2022) analizan su impacto en la optimización de procesos, la reducción de desperdicios y la producción de geometrías complejas que son muy costosas de fabricar mediante técnicas convencionales como la fundición, moldeo y mecanizado. Este avance tecnológico ha impulsado la investigación en nuevas tecnologías y la obtención de microestructuras nuevas inherentes al proceso como la producción de microestructuras nuevas asociadas a grandes velocidades de enfriamiento, fusión localizada, granos columnares y

formación de precipitados que no se producen en los procesos convencionales. Su aplicación se ha venido expandiendo en sectores como el aeroespacial, biomedicina y automotriz. Por otro lado, se considera que los países líderes en tecnología, como Estados Unidos, Alemania y China, han adoptado la AM en sectores clave para su desarrollo económico; por ejemplo, en la industria aeroespacial, empresas como Boeing y Airbus utilizan piezas fabricadas mediante AM para reducir el peso de sus aeronaves y mejorar la eficiencia en el consumo de combustible, al igual que reducir tiempos de producción (Cabrera, 2019; Mora, 2024).

Ya en el contexto nacional, Colombia, como país en vía de desarrollo, enfrenta desafíos particulares en la adopción de tecnologías avanzadas como la fabricación aditiva de metales; autores como Muñoz (2022) enuncia que aunque el país ha mostrado interés en impulsar la industria 4.0 y la innovación tecnológica, la implementación de la AM se ve limitada por varios factores. Uno de los principales es la falta de infraestructura especializada, ya que los equipos de fabricación aditiva son costosos y requieren mantenimiento especializado. Además, existe una escasa formación de profesionales en este campo, lo que dificulta la adopción y el desarrollo de la tecnología a nivel local; siendo la industria colombiana la más perjudicada ya que aún depende en gran medida de métodos de fabricación tradicionales, como el mecanizado y la fundición, lo que dificulta la transición hacia tecnologías más avanzadas; sin embargo, la AM ofrece oportunidades únicas para el país, especialmente en sectores emergentes como el de la medicina y el energético.

Con base a lo expuesto anteriormente, en el presente estudio se realizará un análisis bibliográfico de los métodos de fabricación aditiva utilizados para la producción de componentes metálicos. El fin es identificar las características microestructurales obtenidas por estos métodos las cuales están relacionadas con el tamaño de grano, anisotropía, precipitados microestructurales,

las ventajas, limitaciones y aplicaciones industriales más prometedoras; surgiendo de esta manera la pregunta de investigación que guía el estudio la cual radica en: ¿Cuáles son los principales avances en los métodos de fabricación aditiva de metales y las características microestructurales inherentes que pueden optimizarse para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas?

De este modo, para responder a esta pregunta, se plantea la revisión bibliográfica que pueda mostrar a la comunidad científica los principales avances en este campo; ya que para el desarrollo de este estudio se considera que a pesar de los desafíos planteados anteriormente, Colombia tiene el potencial de aprovechar la fabricación aditiva de metales para impulsar su desarrollo industrial y tecnológico y para lograrlo, es necesario comprender los avances internacionales y nacionales en este campo, identificando las barreras locales y proponer estrategias que permitan la adopción de esta tecnología de manera eficiente y sostenible.

2. Objetivos

En este capítulo se presentan los diferentes objetivos planteados para el estudio:

2.1 Objetivo General

Realizar un análisis bibliográfico sobre los avances en los métodos de manufactura aditiva utilizados para la fabricación de componentes metálicos, con énfasis en la identificación de las ventajas y los desafíos que enfrentan las tecnologías actuales.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar las características de los métodos de manufactura aditiva para la fabricación de componentes metálicos y su relación con las ventajas y desafíos tecnológicos.

Reconocer las aplicaciones industriales relevantes de los métodos de fabricación aditiva de metales, identificando sus tendencias futuras en diferentes sectores como aeronáutico, automovilístico y de la salud.

Identificar las principales diferencias microestructurales de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva y las obtenidas por procesos tradicionales de colada para las aleaciones INCONEL 718, titanio y acero para herramientas.

3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo el análisis bibliográfico sobre los métodos de fabricación aditiva de componentes metálicos, la cual se basó en el estudio desarrollado por Buitrago (2024); según las recomendaciones del autor la metodología propuesta se basa en fases; las cuales tienen la característica de ser secuenciales y que dependen una de otra para su desarrollo; de este modo se prevé que estas se retroalimentan entre sí para garantizar una revisión sistemática y exhaustiva del estado del arte en el tema de estudio (figura 1).

Figura 1

Metodología del Estudio



Nota: se coloca en evidencia que la metodología es secuencial dependiendo de la culminación de una etapa para continuar con la siguiente.

3.1 Búsqueda de la Información

La primera etapa consistió en la búsqueda sistemática de información en diversas fuentes bibliográficas. Para ello, se utilizaron bases de datos científicas y técnicas, como Scopus, Science

Direct, Google Scholar, y repositorios de tesis y artículos científicos; además, se consultaron normas técnicas, y libros especializados en fabricación aditiva. Además, se emplearon ecuaciones de búsqueda que incluyeron términos clave relacionados con la fabricación aditiva de metales, como: "Additive manufacturing of metals"; "Laser Powder Bed Fusion (LPBF)"; "Direct Energy Deposition (DED)"; "Electron Beam Melting (EBM)" y "Metal additive manufacturing challenges". Estas ecuaciones de búsqueda permitieron identificar un amplio conjunto de documentos relevantes, que fueron filtrados según su pertinencia y calidad; priorizando los artículos revisados por pares, tesis doctorales, y documentos publicados en revistas de alto impacto.

3.2 Organización de la Información

Se analizaron 80 documentos; una vez se recopiló la información, se procedió a su organización sistemática; para ello, se utilizó herramientas de gestión documental como Zotero; esta app mediante la recolección de metadatos indica el número de artículos o trabajos teniendo en cuenta palabras claves que permitieron reconocer los puntos claves para el análisis del estudio; permitiendo de esta manera el conteo de los documentos que permitieron clasificar los documentos por autor, año de publicación, tema y relevancia (estadística cuantitativa); facilitando la creación de una base de datos estructurada, donde se almacenaran los metadatos de cada documento, incluyendo resúmenes, palabras clave y citas relevantes; para identificar los principales autores, las tendencias de investigación y las áreas de oportunidad en el campo de la fabricación aditiva de metales.

3.3 Estudio de las Características de la Manufactura Aditiva

La tercera fase consiste en el análisis cualitativo y cuantitativo de la información recopilada; esta se realizó mediante un análisis de co-citación para identificar los autores y

documentos más influyentes en el campo de la fabricación aditiva de metales; además, se analizaron las tendencias de publicación por año, país y área de investigación, lo que permite identificar los principales focos de desarrollo tecnológico. Por último, Se llevó a cabo un análisis detallado de los documentos más relevantes, centrándose en los siguientes aspectos:

- Tecnologías de fabricación aditiva: Se compararon las técnicas L-PBF, L-DED y EBM, identificando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones industriales.
- Propiedades mecánicas: Se analizaron los factores que influyen en las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas, como la porosidad, las tensiones residuales y la microestructura.
- Optimización de procesos: Se revisaron los avances en la optimización de parámetros de procesamiento, como la potencia del láser, la velocidad de escaneo y las condiciones de trabajo.
- Aplicaciones industriales: Se identificaron las aplicaciones más prometedoras en sectores como el aeroespacial, automotriz y médico, destacando casos de éxito y desafíos pendientes.
- Finalmente, se sintetizaron los resultados obtenidos, destacando las tendencias futuras y las áreas de oportunidad para la implementación de la fabricación aditiva de metales en la industria.

3.4 Identificación de las Diferencias de la Microestructura de las Piezas Obtenidas por Manufactura

Esta etapa del estudio se enfocó en examinar las microestructuras de componentes metálicos fabricados como el Inconel 718, titanio y acero de herramientas mediante diferentes técnicas. Primero, se recopilaron y organizarán datos de estudios previos que describan las características microestructurales obtenidas tanto en manufactura aditiva como en procesos convencionales (colada).

El análisis se estructuró en dos aspectos principales:

- a) **Identificación de parámetros clave:** Se catalogarán los factores que influyen en la microestructura (energía de fusión, velocidad de enfriamiento, etc.) para cada método de fabricación.
- b) **Relación con propiedades:** Se establecerán conexiones entre las características microestructurales identificadas y su potencial impacto en el comportamiento mecánico del material.

Para realizar este análisis, se emplearon herramientas de visualización de datos que para este caso se utilizó el Excel y se aplicó un enfoque crítico para evaluar la consistencia de los hallazgos reportados en la literatura. El proceso fue iterativo, permitiendo ajustar los criterios de comparación según la información disponible.

4. Resultados

A continuación, se exponen los hallazgos más significativos, de acuerdo a la metodología propuesta.

4.1. Búsqueda de la Información

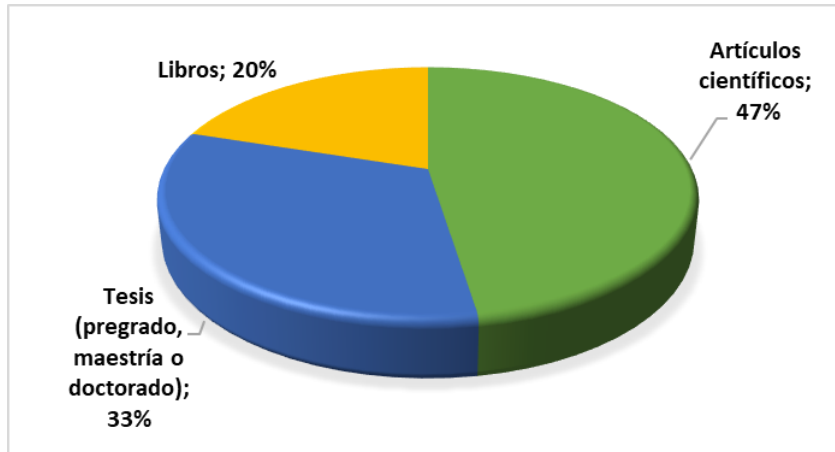
De acuerdo a lo planteado en la metodología, la búsqueda de información fue sintetizada en el apéndice A, en la cual se evidencia la recolección de la información se tuvo en cuenta parámetros como el tiempo de publicación del artículo el cual es del periodo de tiempo 2020- 2025 y la finalidad con el estudio en cuanto a la manufactura aditiva para metales según las ecuaciones de búsqueda planteados en el numeral 3.1.

4.2 Organización de la Información

La información recolectada fueron 80 documentos los cuales se realizaron dos análisis de estos, según la metodología expuesta en el numeral 3.2; como primera medida se indica el tipo de documento analizado, en la figura 2, en la cual se puede evidenciar principalmente el tipo de documento el cual se analizó en este se detalla que son los artículos científicos relacionados con la manufactura metálica, esto debido a que los buscadores en los cuales se desarrolló este proceso muestran a nivel mundial artículos que son específicos para las temáticas a analizar, además se reconoce que la elaboración de un libro es un proceso que demanda mayor tipo de investigación por parte del autor, por ende es menos recurrente encontrar bibliografía actualizada en cuanto a la AM en este tipo de documento; por otro lado, de las tesis analizadas demuestran que el campo de acción pertinente a este estudio son desarrolladas desde niveles básicos de investigación como son los estudios de pregrado, hasta los estudios de investigación avanzada como lo son las tesis doctorales.

Figura 2

Tipo de Documento Analizado en el Estudio



Nota: se evidencia el uso mayormente de artículos científicos para el desarrollo del estudio.

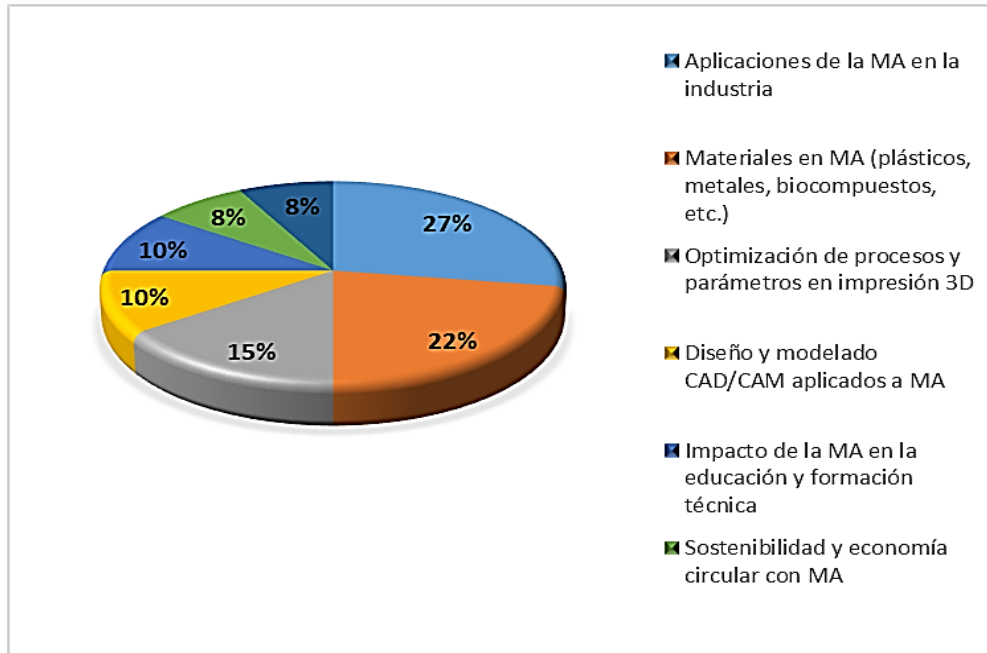
Otro aspecto a analizar comprende al análisis del presente estudio, en cuanto a la agrupación de estudio dependiendo de la subdivisión de las temáticas de la manufactura metálica; en la figura 3, se expone el porcentaje de temáticas que mayormente fueron encontradas; la mayoría se concentra en las aplicaciones industriales de la AM, evidenciando un enfoque orientado a resolver necesidades prácticas en sectores como la salud, la automoción y la manufactura avanzada. Otro grupo significativo de estudios se centra en la caracterización y análisis de materiales, incluyendo, la manufactura de metales fundamentales para garantizar la eficiencia y calidad de las piezas fabricadas mediante tecnologías 3D.

Asimismo, se identifican investigaciones enfocadas en la optimización de procesos y parámetros técnicos, con el fin de mejorar el rendimiento y precisión en la impresión; a su vez, temáticas como el diseño asistido por computador (CAD/CAM), el impacto de la AM en la educación y formación técnica, la sostenibilidad y economía circular, y las normativas de calidad

en los procesos también están presentes, reflejando un enfoque multidisciplinar que articula lo técnico, lo formativo y lo ambiental.

Figura 3

Subcategorías de Análisis en la Revisión Bibliográfica



Nota: se detalla que los estudios analizados mayormente se clasifican en aplicaciones de la AM, seguida del tipo de materiales que se utilizan en este proceso.

4.3 Estudio de las Características de la Manufactura Aditiva

Inicialmente se inicia hablando de las generalidades de la AM

4.3.1. Manufactura Aditiva

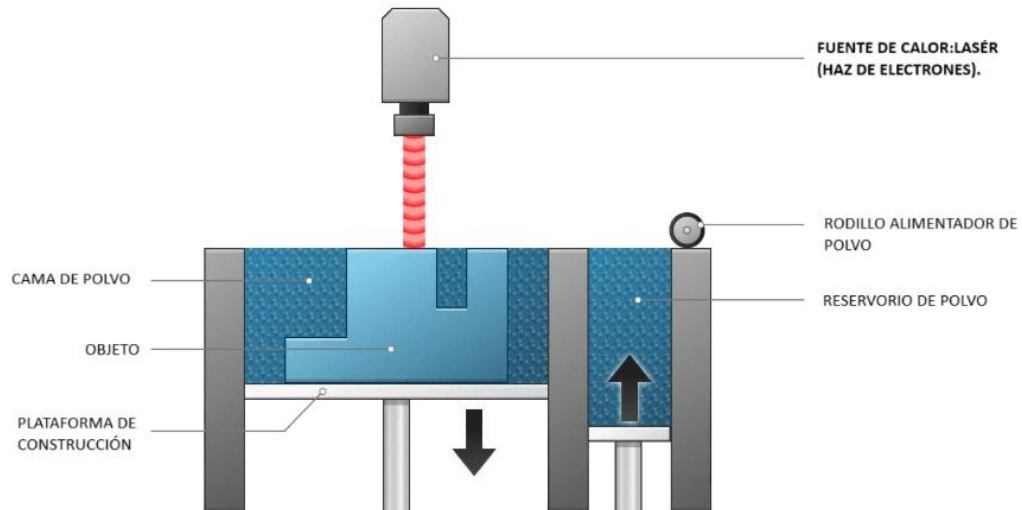
Según la definición de la Norma 52921 ISO/ASTM, la fabricación aditiva es el proceso de fabricar objetos tridimensionales a partir de un modelo predeterminado por un ordenador CAD (UNE, 2017); de esta manera autores como Cedillo & Carrillo (2024) exponen que la fabricación aditiva de piezas metálicas ha emergido como una de las tecnologías más disruptivas en la

manufactura moderna; que anteriormente eran conocida como Prototipado Rápido o Impresión 3D (Atehortúa & Saldarriaga, 2023). Estas técnicas han evolucionado más allá de su propósito inicial de crear modelos y prototipos, convirtiéndose en un pilar fundamental en diversas industrias, como la automotriz, aeroespacial y la medicina (Monar & Freire, 2024); su impacto ha sido tan significativo que se la considera un componente clave de la Industria 4.0, ya que introduce soluciones inteligentes y automatizadas que optimizan los procesos de producción.

A diferencia de los métodos de fabricación convencionales, que suelen basarse en la eliminación de material (mecanizado, fresado o torneado), la fabricación aditiva construye objetos tridimensionales añadiendo material capa por capa a partir de un modelo digital (Olea & Aracena, 2023).

4.3.2. Fabricación Aditiva Basada en Polvos

La fabricación aditiva basada en polvos es una de las técnicas más utilizadas en la producción de piezas metálicas; este método utiliza polvo metálico que tienen características específicas como el tamaño entre los 15 – 45 micras; como materia prima, el cual es fundido mediante técnicas como la sinterización selectiva por láser (SLM) o la impresión 3D (3DP); conocida también como lecho de polvo, esta técnica para la SLM se compone de dos fases: en la primera fase, el material de aporte (polvo) se deposita sobre la capa anterior, y en la segunda, se aplica una fuente de alta energía sobre el polvo predepositado para fundirlo y solidificarlo (Olea & Aracena, 2023) (ver figura 5).

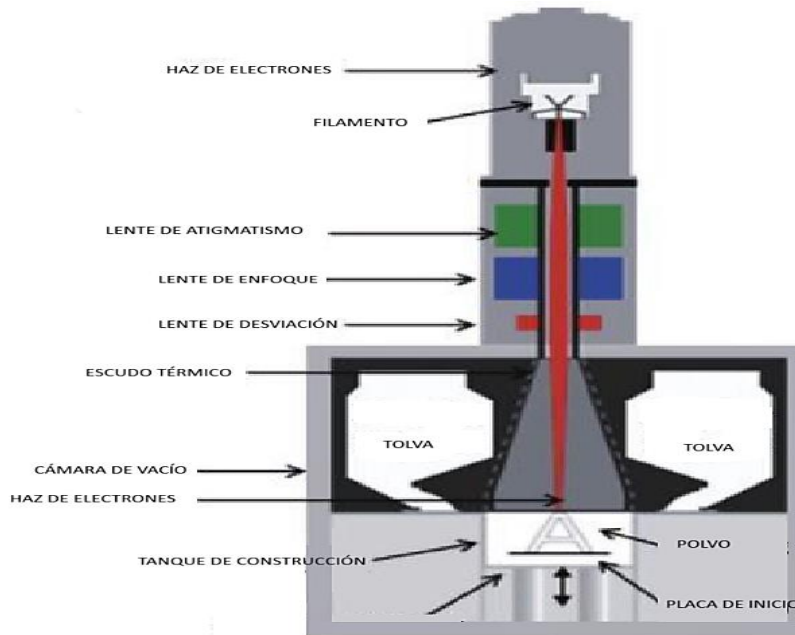
Figura 4*Fusión de Lecho de Polvo*

Nota: se evidencia el esquema de la producción de la manufactura mediante lecho de polvo.

Fuente: (Romero, 2017).

4.3.3. Fusión por Haz de Electrones (EBM)

Este es un proceso conocido como EBM por su significado en inglés de Electron Beam Melting. comenzó a implementarse a partir del año 2000, aunque la tecnología de fabricación aditiva inició su desarrollo a mediados de la década de 1980. Se caracteriza porque este método consiste en la adición de polvo metálico capa por capa, que se funde selectivamente usando un haz de electrones como fuente de calor. De este modo, la fabricación se realiza en un entorno de vacío, lo que evita que el material fundido se contamine debido a la exposición a una atmósfera reactiva impidiendo la oxidación del material, incluso al emplear metales con alta afinidad al oxígeno, como el titanio. Además, este método elimina la necesidad de utilizar gases inertes adicionales, a diferencia de otras tecnologías (Kolamroudi *et al.*, 2021) (ver figura 3).

Figura 5*Electron Beam Melting (EBM)*

Nota: se coloca en evidencia la producción de piezas mediante este método. Fuente: (Farooq *et al.*, 2024)

4.3.4. Avances en las Técnicas de Fabricación Aditiva

Autores como Srivastava *et al.*, (2023) indican que con el paso del tiempo la fabricación aditiva de metales ha mejorado permitiendo producir objetos con geometría más complicadas con características o cualidades mecánicas optimizadas; principalmente utilizadas para crear prototipos, ha pasado a ser lo más rentable y sostenible en la manufactura de materiales funcionales. Evidenciado de esta manera que las técnicas más utilizadas como la de Laser Powder Bed Fusion (LPBF), Direct Energy Deposition (DED) y Selective Laser Sinteting (SLS). En la tabla 1, se evidencia la evolución de estas técnicas de una forma positiva la calidad de los

componentes de los productos finales optimizando los parámetros y el uso de herramientas como el escaneo avanzado.

Se reconoce que la bibliográfica expone que entre los procesos más utilizados en la manufactura aditiva es la optimización de las estrategias de escaneo en LPBF. Estudios y análisis recientes demuestran que la rapidez del láser, el mando o dirección del láser como su método de partición en islas influyen muy significativamente en la calidad de los productos (Naprimerova *et al.*, 2025), reconociendo que ajustes en estos parámetros han reducido de una forma positiva defectos en las estructuras como la anisotropía, y fisuras visibles en los componentes físicos. Por otro lado, se encontró que en la ejecución de adaptaciones y ajustes en la potencia del láser ha mejorado la distribución del calor durante los procesos de fusión, dando como resultados que las piezas construidas sean más homogéneas en la microestructura mejorando las propiedades físicas. Siendo aspectos fundamentales para aplicar resistencia estructural sobre todo a las partes más críticas, mejorando además la manufactura de los componentes necesitando menos tratamiento post-proceso (Livatyali & Keles, 2025).

La evolución en estas estructuras en tiempo real ha permitido avanzar en la fabricación aditiva. Como muestra DED, la agrupación de sensores ópticos y cámaras de calor mejoran la supervisión y control de los procesos de acumulación de materiales (Fullington, 2024). Se reconoce además que por cuenta de las Inteligencias Artificiales (IA), estas herramientas pueden detectar fallas en las estructuras y corregirlas de forma eficaz y eficiente en el mismo momento de encontrarlos; gracias a estos métodos y herramientas que reducen la variabilidad en la calidad del producto permitiendo incrementar la repetibilidad en los procedimientos, logrando reducir los desperdicios de material, contribuyendo a la reducción de los costos de la manufactura aditiva. En

otras ramas como la aeroespacial o el automotriz donde se debe ser más preciso y fidedigno son muy esenciales estos progresos permiten una mayor adopción de DED.

Tabla 1

Comparación de Diversas Técnicas De Manufactura Aditiva

Característica	L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)	L-DED (Laser Direct Energy Deposition)	SLS (Selective Laser Sintering)
Definición	Utiliza un láser para fusionar polvo metálico capa por capa en un lecho de polvo (Olea & Aracena, 2023).	Deposita material en forma de polvo o alambre fundido mediante un láser, permitiendo reparaciones y fabricación de grandes piezas (Srivastava <i>et al.</i> , 2023).	Emplea un láser para sinterizar (no fundir completamente) polvo metálico o polímero, creando piezas porosas (Zhong <i>et al.</i> , 2020).
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisión y resolución. - Piezas con densidad >99%. - Ideal para geometrías complejas (Pérez, 2024). 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilidad para piezas grandes y reparaciones. - Mayor velocidad de producción. - Menor desperdicio de material (Flores <i>et al.</i>, 2025). 	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere soportes estructurales. - Versatilidad en materiales (metales, polímeros, cerámicos). - Buen balance costo-beneficio (Romero, 2017).
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Costo elevado de polvos y equipos. - Requiere soportes para estructuras complejas (Martínez, 2020). 	<ul style="list-style-type: none"> - Acabado superficial menos refinado. - Menor precisión dimensional comparado con L-PBF (Quiceno, 2024). 	<ul style="list-style-type: none"> - Piezas con mayor porosidad (menor densidad). - Propiedades mecánicas inferiores a L-PBF. - Post-procesado necesario para mejorar resistencia (Fullington, 2024).
Aplicaciones Industriales	<ul style="list-style-type: none"> - Aeroespacial: componentes livianos y resistentes (García, 2024). - Biomédica: implantes personalizados (Monar & Freire, 2024). 	<ul style="list-style-type: none"> - Automotriz: reparación de turbinas y componentes (Singh <i>et al.</i>, 2025). - Energía: piezas grandes para turbinas (Morell <i>et al.</i>, 2024). 	<ul style="list-style-type: none"> - Prototipado rápido en polímeros. - Piezas porosas para filtros o andamios biomédicos (Caggiano <i>et al.</i>, 2025). - Industria de consumo: piezas ligeras no estructurales.

Nota: se muestra la comparación de las tres tecnologías que predominan los estudios analizados.

Otra consideración que se detalló en el análisis del estudio es que los industriales buscan cada vez mejores formas de producir donde estas sean menos contaminantes y tengan un menor impacto ambiental sin comprometer las calidades de los productos (Ren *et al.*, 2025; Sivaraj *et al.*, 2025), encontrándose mayores avances integrados a métodos híbridos combinando manufactura aditiva con métodos tradicionales; específicamente, en las combinaciones de LPBF con mecanizado CNC donde se evidencia la mejora en la precisión de los acabados de los productos producidos. Esta perspectiva ha mejorado la producción de los componentes que necesitan resistencias dimensionales estrictas. Facilitando las reparaciones de partes metálicas que tienen complejidad con ahorro de material y en menor tiempo de fabricación.

4.3.5. Comparación de las Distintas Metodologías Analizadas

El avance de la fabricación aditiva producido que se implementen gran variedad de metodologías, cada una de estas con características específicas que logran adecuarse a diferentes aplicaciones. Entre las más implementadas la Fisión de Lecho de Polvo por Laser (LPBF), la Deposición Directa de Energía (DED) y la Sinterización Selectiva por Laser (SLS). Donde estas técnicas poseen ventajas y desventajas en cuanto a la precisión, precios de fabricación y propiedades de los materiales en su fase final. Autores como Elambasseril *et al.* (2023) enuncia que la LPBF es la técnica más utilizada en áreas como la biomédica y la aeroespacial por su buena eficiencia para producir piezas con alta densidad y excelente resolución. Igualmente, pero para otros casos la, DED que ha mostrado ser una respuesta funcional para la fabricación y restauración de componentes de gran dimensión, aunque no son tan precisos que LPBF.

En disparidad, la técnica de SLS permite la producción de elementos sin estructuras de soporte, pero estas pueden realizar piezas con mucha más porosidad (Zhong *et al.*, 2020). Por ende, el LPBF es considerado como una de las técnicas que ha tenido mayores avances y precisas en la

manufactura aditiva de los metales; concibiéndose que estos procedimientos facilitan la fabricación con una microestructura controlada y una densidad mayor en un porcentaje del 99%, lo que da garantías a sus propiedades mecánicas muy parecidas a las que se obtienen en métodos tradicionales. No obstante, el LPBF exige el uso de polvos metálicos muy refinados y ambientes controladas que evitan la oxidación de los elementos, aumentando los costos de operación comparado con los de más métodos (Pérez, 2024).

Flores *et al.* (2025) indican que el DED es muy popular en la industria automovilística, aeroespacial y energética por su capacidad para producir piezas de gran escala con mucha más rapidez. Esto hace que producir piezas de gran proporción se realicen con mayor eficiencia y en menor tiempo. Pero con menos calidad y acabados superficiales. También DED es muy utilizado para reparar los materiales metálicos con mucho uso, lo que la vuelve en una tecnología de las más usadas para reducir el valor de la producción Singh *et al.* (2025). Por consiguiente, el SLS se ha consolidado como otra técnica de mucho estudio por su facilidad de producir estructuras con geometría muy complejas sin utilizar estructuras de soporte. Esta técnica hace uso de un láser para sinterizar selectivamente partículas de polvo, agrupando por capas hasta completar la estructura, no obstante, una de sus limitantes es que hay mucha porosidad en comparación con LPBF, Lo que pudiera afectar negativamente al producto final (Fullington, 2024). Para reducir esta dificultad, se ha progresado en procesos de post-tratamiento, como la introducir resina y la aplicación de energía calórica para densificar el material.

Por consiguiente, se reconoce que la elección de la técnica apropiada depende de diversos factores, como la precisión que se desea el material a utilizar y las aplicaciones para finalizar el producto. LPBF en este momento es la mejor opción para productos que se enfoquen en la calidad y su exactitud según la dimensión, en cambio DED es la más apropiada para elementos de mayor

tamaño y corregir estructuras metálicas. Sin embargo, los progresos en manufactura aditiva han desarrollado técnicas mixtas que combinan lo mejor de diferentes métodos.

4.3.6. Aplicaciones Industriales

Sánchez (2024) expone que en el sector de la biomédica, la fabricación aditiva ha mejorado la forma en que se hacen y fabrican prótesis, implantes y dispositivos médicos hechos a la medida; la destreza de producir e imprimir estructuras con formas específicas facilitado el crecimiento implantes óseos y dentales que son a la medida que el paciente requiere. Reconociéndose que Productos como el titanio las aleaciones de cobalto-cromo son muy utilizados por su biocompatibilidad y dureza mecánica; estas evoluciones han avanzado significativamente la calidad de vida de los enfermos y han mermado los tiempos de mejora en los procedimientos médicos.

En el sector automotriz Quiceno (2024) indica que se ha utilizado para la producción aditiva en los componentes estructurales, partes de buen rendimiento y modelos funcionales; empresas con un amplio bagaje en la producción automotriz han utilizado este método para mejorar la aerodinámica de los vehículos y bajar el peso de las carrocerías; con la impresión en formatos de manufactura aditiva se permite la producción de productos al gusto de los clientes para automóviles de gama alta y vehículos eléctricos, los cuales se necesitan que sean eficientes energéticamente. También se evidencia que la manufactura aditiva también utilizada en la fabricación de herramientas y moldes en tiempos de producción reducidos en similitud con las técnicas convencionales (Pilataxi, 2024). La reducción de precios y la mejora en modelos de componentes han empujado la incorporación de estos métodos en la fabricación de vehículos.

En cuanto al sector energético Morell *et al.*, (2024) expone que se han visto aplicaciones importantes en la manufactura aditiva, fundamentalmente en la producción de partes para las

turbinas, intercambiadores de calor y métodos de almacenamientos de energía; indicando que el potencial de producir partes con sistemas optimizados ha mejorado la optimización en la transferencia de calor y disminuir el consumo de combustible en la industria de producción de energía. Igualmente, la manufactura aditiva se ha utilizado en la fabricación de partes para la industria petrolífera y gasifica, donde se requiere materiales con muy buena resistencia a la corrosión y temperaturas exageradas; por ende, la posibilidad de producir partes bajo demanda ha disminuido la demanda de residuos la supeditación de cadenas de suministro habituales esto ha permitido mayor modificabilidad en la fabricación (Muñoz *et al.*, 2024). Estos progresos han contribuido a el mejoramiento de los procesos industriales y reducen los precios de operación del sector energético.

García (2024) expone que otro sector en el cual se desarrolla la manufactura aditiva es el sector aeroespacial el cual ha evolucionado especialmente en la fabricación de motores y estructuras de propulsión; de este modo, la capacidad de producción de componentes más ligeros con una muy buena resistencia sistemática ha permitido productividad de los combustibles en aeronaves espaciales y en aviones. Empresas como Boeing y Airbus han aprovechado esta tecnología en la producción de partes críticas, minimizando gastos y tiempos de fabricación (García, 2024). Así mismo, la NASA ha recorrido en el uso de la manufactura aditiva en producción de sistemas para misiones espaciales, utilizando la capacidad de imprimir partes directamente en el espacio (Głowacka *et al.*, 2025).

4.3.7. Tendencias Futuras y Oportunidades de Mejora en la Manufactura Aditiva

Salas & Altamirano (2025) expone que en la actualidad muchos de los polvos metálicos usados en la manufactura aditiva fueron adaptados de aleaciones que ya existen, lo que recorta su rendimiento en varias aplicaciones. Se espera que, en los años futuros, haya nuevas aleaciones

mejoradas para procesos aditivos, aumentando la resistencia mecánica y su durabilidad en las piezas. Por otro lado, se expone que la integración de la manufactura aditiva con la IA y aprendizaje automático para mejorar los procedimientos de impresión; indicando que el manejo de los algoritmos mejorados que permitan deducir falencias en tiempo real y ajustar estas falencias automáticamente en los parámetros de impresión donde sean más eficaces y eficientes para producir las piezas construidas (Infante, 2025).

Por otro lado, se están investigando métodos para reducir el desperdicio de material y mejorar la reutilización de polvos metálicos sin comprometer la calidad de las piezas fabricadas; para de esta manera demostrar que la fabricación aditiva pueda ser una alternativa más sostenible en comparación con los métodos de manufactura convencionales, al reducir la cantidad de residuos generados durante la producción; se espera que en los próximos años se desarrollen estrategias para minimizar la huella de carbono de los procesos aditivos, incluyendo la optimización del consumo energético y la utilización de materiales reciclables (Caggiano *et al.*, 2025). Estas mejoras permitirán que la manufactura aditiva sea una opción más viable y competitiva en términos medioambientales.

Otra oportunidad de mejora radica en la optimización de la velocidad de impresión y la escalabilidad de los procesos de manufactura aditiva; actualmente una de las principales limitaciones de esta tecnología en metales es el tiempo requerido para fabricar piezas de gran tamaño con alta precisión y la necesidad de desarrollar nuevas estrategias de escaneo laser y deposición de material para acelerar la fabricación sin comprometer la calidad del producto final (Sierra, 2023). Además, el uso de sistemas de impresión multilateral permitirá la creación de componentes híbridos con propiedades mejoradas; siendo estas innovaciones clave para la adopción masiva de la manufactura aditiva en la producción a gran escala. Diciéndose de esta

manera, que la mejora en la velocidad de producción reducirá los costos y aumentará la competitividad de esta tecnología frente a los métodos tradicionales.

La digitalización y la simulación avanzada jugarán un papel clave en la mejora de los procesos de manufactura aditiva; el uso de gemelos digitales permitirá modelar y predecir el comportamiento de los materiales durante la impresión, optimizando los parámetros de fabricación antes de la producción real. Esto reducirá el desperdicio de material y mejorará la confiabilidad de los componentes fabricados, además, la simulación computacional permitirá desarrollar diseños optimizados con estructuras internas mejoradas para reducir peso y aumentar la resistencia. Las herramientas digitales serán fundamentales para acelerar la adopción de la manufactura aditiva en sectores industriales con altos requisitos técnicos.

4.4. Identificación de las Diferencias de la Microestructura de las Piezas Obtenidas por Manufactura

A continuación, se identifican las microestructuras obtenidas a partir del AM en comparación de las obtenidas por colada tradicional:

4.4.1. Parámetros Clave en la Formación de Microestructuras

Chen *et al.* (2024) expone que la manufactura aditiva (AM) se caracteriza por parámetros únicos como alta energía de fusión ($100\text{-}500\text{ J/mm}^3$), velocidades de enfriamiento extremas ($10^5\text{-}10^7\text{ K/s}$) y ciclos térmicos repetitivos que generan microestructuras anisotrópicas; estos factores contrastan con los procesos tradicionales de colada, expuestos por Wang *et al.* (2020) donde las velocidades de enfriamiento son más lentas ($10^0\text{-}10^2\text{ K/s}$) que permiten el desarrollo de estructuras equiaxiales y mayor equilibrio termodinámico. Además, se reconoce que la solidificación direccional en AM produce texturas cristalográficas preferenciales, mientras que la nucleación

homogénea en colada favorece distribuciones aleatorias de granos. Adicionalmente, el gradiente térmico en AM (10^3 – 10^5 K/mm) promueve morfologías dendríticas alineadas, ausentes en piezas coladas. En la tabla 2 se exponen ciertos parámetros que permiten reconocer las diferentes características entre estas.

Tabla 2

Microestructura de piezas obtenidas mediante AM

Material	Manufactura Aditiva (AM)	Colada Tradicional	Impacto en Propiedades
Inconel 718	Matriz γ fina (10-50 μm) con precipitados γ''/δ nanométricos (20-100 nm) y estructuras celulares dendríticas (Zhang et al., 2018).	Granos γ gruesos (50-300 μm) con carburos M_{23}C_6 en bordes de grano y fases Laves (Farooq et al., 2024).	AM: Mayor resistencia (1,300 MPa) pero menor ductilidad (12%). Colada: Menor resistencia (900 MPa) pero mayor isotropía y ductilidad (25%).
Ti-6Al-4V	α' martensítica columnar en matriz β residual (Zhong et al., 2020).	Granos equiaxiales $\alpha+\beta$ (20-100 μm) (Kolamroudi et al., 2021).	AM: Alta resistencia (1,100 MPa) pero baja tenacidad (25 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$). Colada: Equilibrio resistencia-ductilidad (850 MPa, 40 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).
Acero H13	Matriz martensítica con carburos MC/ M_7C_3 ultrafinos (50-200 nm) y austenita retenida (5-15%) (Huang et al., 2022).	Carburos M_{23}C_6 angulares (1-5 μm) en estructuras perlíticas/bainíticas.	AM: Mayor dureza (55-60 HRC) y resistencia al desgaste (+20-30%). Colada: Mayor tenacidad (30-40 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Nota: se exponen las diferentes características en cuanto la microestructura de las piezas obtenidas por la AM.

4.4.2. Microestructura del Inconel 718: AM vs. Colada

El Inconel 718 procesado mediante AM desarrolla una microestructura caracterizada por una matriz γ de grano fino (10-50 μm) con una distribución homogénea de precipitados γ'' y δ de tamaño nanométrico (20-100 nm), como se evidencia en estudios recientes (Zhang *et al.*, 2018); esta configuración microestructural única es resultado directo de las altas velocidades de enfriamiento (10^5 - 10^7 K/s) y los gradientes térmicos pronunciados típicos de los procesos aditivos. Particularmente interesante es la formación de estructuras celulares dendríticas submicrométricas, con paredes celulares enriquecidas en elementos como Nb y Mo, que contribuyen significativamente al endurecimiento del material.

En contraste, las piezas obtenidas por colada tradicional presentan una microestructura completamente diferente, caracterizada por granos γ considerablemente más gruesos (50-300 μm) con precipitados coalescentes y una marcada segregación de carburos M_{23}C_6 en los bordes de grano (Farooq *et al.*, 2024). La solidificación más lenta en el proceso de colada permite una mayor difusión atómica, lo que favorece la formación de fases Laves ricas en Nb, conocidas por su efecto detrimental en las propiedades mecánicas. Esta diferencia fundamental en los mecanismos de solidificación explica las variaciones significativas en el comportamiento mecánico observado entre ambos procesos.

4.4.3. Microestructura del Ti-6Al-4V en Manufactura Aditiva vs. Colada Tradicional

El Ti-6Al-4V procesado mediante AM desarrolla una microestructura característica dominada por fases α' martensíticas con morfología columnar, alineadas según la dirección de construcción, adsorbida en una matriz β residual (Zhong *et al.*, 2020); esta configuración única

resulta de las velocidades de enfriamiento extremadamente rápidas ($\sim 10^6$ K/s) típicas de los procesos aditivos, que superan ampliamente la velocidad crítica para la formación de martensita en esta aleación.

En contraste, el Ti-6Al-4V producido por colada tradicional presenta una microestructura completamente diferente, caracterizada por granos equiaxiales $\alpha+\beta$ con bordes de grano bien definidos y un tamaño de grano típicamente entre 20-100 μm (Kolamroudi et al., 2021). Indicando que la velocidad de enfriamiento más lenta en el proceso de colada (10^0 - 10^2 K/s) permite la transformación difusiva completa, evitando la formación de martensita y dando lugar a una estructura bifásica equilibrada. Esta diferencia microestructural fundamental tiene implicaciones significativas en el comportamiento mecánico del material.

4.4.4. Acero de herramienta

Para Huang *et al.* (2022) la AM de aceros de herramienta como el H13 produce microestructuras distintivas caracterizadas por una matriz martensítica con dispersión ultrafina de carburos (50-200 nm) de tipos MC y M_7C_3 , esta distribución homogénea resulta del enfriamiento ultrarrápido (10^5 - 10^6 K/s) que inhibe el crecimiento de carburos y minimiza la segregación interdendrítica típica de procesos de colada. Microscopía avanzada ha revelado que los carburos en AM presentan morfologías esferoidales con interfases coherentes, mientras que en colada predominan carburos $M_{23}C_6$ angulares de 1-5 μm localizados preferentemente en bordes de grano. En contraste, las piezas coladas desarrollan estructuras perlíticas o bainíticas más estables durante el enfriamiento en molde, requiriendo solo un tratamiento térmico convencional de temple y revenido para alcanzar propiedades óptimas.

La comparación entre manufactura aditiva (AM) y colada tradicional revela diferencias microestructurales clave que impactan directamente en las propiedades mecánicas de los materiales estudiados. Para el Inconel 718, la AM produce microestructuras refinadas con alta resistencia (1,300 MPa) pero menor ductilidad (12%), mientras la colada ofrece mayor equilibrio con mejor isotropía. En el Ti-6Al-4V, la AM genera estructuras martensíticas anisotrópicas que requieren tratamientos térmicos para mejorar ductilidad, a diferencia de la microestructura equiaxial equilibrada de la colada. Los aceros de herramienta como el H13 muestran en AM una distribución homogénea de carburos ultra finos que incrementan la dureza (55-60 HRC) y resistencia al desgaste, aunque con menor tenacidad que las piezas coladas.

5. Conclusiones

A partir del análisis bibliográfico se permitió identificar que la manufactura aditiva ha evolucionado considerablemente en los últimos años, consolidándose como una alternativa viable a los métodos tradicionales de fabricación. Se encontraron mejoras en procesos como Laser Powder Bed Fusion (LPBF), Direct Energy Deposition (DED) y SLS (Selective Laser Sintering) cada uno con avances significativos en eficiencia, precisión y reducción de defectos. Los estudios analizados evidencian la importancia de la optimización de parámetros de impresión, el desarrollo de nuevos materiales y la integración de inteligencia artificial en el control del proceso. La revisión demostró que estas innovaciones han facilitado la adopción de la manufactura aditiva en sectores estratégicos como la industria aeroespacial, biomédica y automotriz.

La comparación entre manufactura aditiva (AM) y colada tradicional evidencia diferencias clave en la microestructura de los materiales, resultado de condiciones térmicas muy distintas. La AM genera estructuras finas y anisotrópicas debido a sus altas velocidades de enfriamiento, lo que mejora la resistencia y dureza, aunque con menor ductilidad. En contraste, la colada permite estructuras más gruesas y equilibradas, con mejor isotropía y tenacidad.

De esta manera como conclusión principal se evidencia que la manufactura aditiva de metales es una tecnología en constante evolución con un impacto significativo en diversas industrias y que avances en la optimización de procesos, el monitoreo inteligente y el desarrollo de nuevos materiales están permitiendo que la AM sea una alternativa cada vez más viable frente a los métodos tradicionales. Por esta razón, a pesar de los desafíos en términos de costos, escalabilidad y estandarización los avances recientes sugieren que esta tecnología seguirá expandiéndose y mejorando en los próximos años.

6. Recomendaciones

El estudio realizado se basó en una revisión bibliográfica de múltiples fuentes científicas y técnicas sobre la manufactura aditiva de metales; de esta manera, se exponen las siguientes recomendaciones:

- se recomienda como primera medida para futuras investigaciones con este enfoque, ampliar la cantidad de documentos analizados; incluir la integración de artículos de acceso abierto y literatura técnica de empresas del sector; lo cual se considera que permitirá obtener una visión más completa de los avances en esta área.
- Se recomienda ampliar la investigación sobre las características microestructurales de piezas metálicas producidas mediante diferentes técnicas de AM, con enfoque en su relación con las propiedades mecánicas.
- Sería importante desarrollar un estudio bibliográfico sobre metodologías para la evaluación y certificación de piezas fabricadas aditivamente, especialmente en sectores críticos como aeroespacial y médico. Ya que se considera que la estandarización permitiría mayor confiabilidad en los componentes producidos y facilitaría la adopción industrial a gran escala de estas tecnologías, superando una de las principales barreras actuales para su implementación masiva.

Referencias Bibliográficas

- Alvárez, M., Rodríguez, Ó., Romero, P. E., Molero, E., Torres, J., & Ureña, J. (2022). *Fabricación aditiva de herramientas en INCONEL 718 para soldadura por FSW mediante tecnología de deposición por láser LMD*. <https://hdl.handle.net/20.500.14468/19899>
- Atehortúa, J. D., & Saldarriaga, J. D. (2023). Diseño 3D del sistema mecánico para el proyecto de investigación a cargo del semillero Sir denominado “prototipo de generador eléctrico de movimiento perpetuo con uso de imanes de neodimio”. *Institución Universitaria Pascual Bravo*. <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/2120>
- Buitrago, S. (2024). *Descubriendo el potencial de la tecnología aditiva en el sector metalmecánico*. <https://hdl.handle.net/11059/15637>
- Cabrera, M. (2019). *Reducción de peso en el motor TPE331-10 mediante la utilización del Diseño para Manufactura Aditiva* [Thesis, DSM]. <https://repositorio.cetys.mx/handle/60000/1116>
- Caggiano, M., Saffioti, M. R., & Rotella, G. (2025). Fiber Metal Laminates: The Role of the Metal Surface and Sustainability Aspects. *Journal of Composites Science*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/jcs9010035>
- Cedillo, A. G., & Carrillo, J. M. S. (2024). Diseño e Impresión de Prototipos y Productos 3D para el Desarrollo Tecnológico en Manufactura Aditiva. *RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación*, 2(Especial 1), Article Especial 1.
- Chen, Y., Wang, W., Ou, Y., Chang, H., Wu, Y., Yang, R., Zhai, Z., Li, K., & Shen, L. (2024). Microstructure and mechanical property comparison of Inconel alloys fabricated using micro and conventional laser powder bed fusion. *Materials & Design*, 237, 112534. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112534>

- Elambasseril, J., Rogers, J., Wallbrink, C., Munk, D., Leary, M., & Qian, M. (2023). Laser powder bed fusion additive manufacturing (LPBF-AM): The influence of design features and LPBF variables on surface topography and effect on fatigue properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 48(1), 132-168. <https://doi.org/10.1080/10408436.2022.2041396>
- Farooq, A., Abdu, A. M., Khurram, A., & Haizum, A. (2024). (PDF) An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals. *ResearchGate*, 8.
- Flores, J., Cabanes, I., Gutierrez, A., de Calle, K. L., Gonzalo, O., & Portillo, E. (2025). An innovative smart monitoring system for DED-LB/MW process stability based on machine learning techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137(3), 1759-1773. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15134-5>
- Fullington, D. (2024). Enhanced intellectual property protection mechanisms towards collaborative data sharing in metal-based additive manufacturing. *Theses and Dissertations*. <https://scholarsjunction.msstate.edu/td/6361>
- García, A. (2024). *APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA FABRICACIÓN ADITIVA DE METALES MEDIANTE FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLM) EN EL SECTOR AEROESPACIAL*. <https://hdl.handle.net/10115/40264>
- Głowacka, K., Klemenc, J., Nagode, M., & Łagoda, T. (2025). Fatigue lifetime of rubber composites – State-of-the-art. *Polymer Testing*, 143, 108713. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108713>
- Huang, G., Wei, K., & Zeng, X. (2022). Microstructure and mechanical properties of H13 tool steel fabricated by high power laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 858, 144154. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144154>

- Infante, L. C. (2025). Gerencia sostenible en la era de la industria 5.0: Estrategias y desafíos para un futuro responsable. *CICAG: Revista del Centro de Investigación de Ciencias Administrativas y Gerenciales*, 22(1), 98-115.
- Kolamroudi, M. K., Asmael, M., Ilkan, M., & Kordani, N. (2021). Developments on Electron Beam Melting (EBM) of Ti–6Al–4V: A Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(4), 783-790. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02230-9>
- Langfeld, A. (2019). Las posibilidades de la fabricación aditiva metálica. *Metalindustria*, 26, 82-84.
- Livatyali, H., & Keles, O. (2025). Additive Friction Stir Deposition for Aluminum Alloys in Aerospace Applications. En S. Gürgen (Ed.), *Aluminum Technologies in Aerospace Applications* (pp. 149-188). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82447-0_7
- Martínez, J. J. (2020). *Mejora de la eficiencia energética en la industria mediante la aplicación de tecnologías de fabricación aditiva en metales* [Master thesis]. <https://rodin.uca.es/handle/10498/31324>
- Monar, M. B., & Freire, B. (2024). Aplicación de la fabricación aditiva en el campo de la medicina. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, 236, 17-25.
- Mora, J. (2024). *Análisis geométrico de piezas obtenidas con Fabricación Aditiva mediante la técnica de fotopolimerización* [Bachelor thesis]. <https://rodin.uca.es/handle/10498/31561>
- Morell, C., Miralbes, R., & Martin, C. L. (with Universidad de Zaragoza). (2024). *Diseño, análisis estructural y prototipado de la estructura inferior de un patinete eléctrico mediante fabricación aditiva*. Universidad de Zaragoza.

- Muñoz, D. S., Valencia, K. T., Caviativa, Y. P., & Castillo, J. S. (2024). Estado actual de la adopción de la industria 4.0 en pymes colombianas: Desafíos y oportunidades. *Revista Politécnica*, 20(39), Article 39. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n39a7>
- Muñoz, P. A. (2022). *Estudio de viabilidad sobre la implementación de manufactura aditiva de metal a nivel académico en Colombia* [Pregrado, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES]. <http://hdl.handle.net/1992/55477>
- Naprimerova, E. D., Yu. Pashkeev, K., Yurasova, E. V., Litvinyuk, K. S., Trofimova, S. N., & Samodurova, M. N. (2025). Impact of laser hardening on surface properties of billets from structural materials. *Metallurgist*. <https://doi.org/10.1007/s11015-025-01886-8>
- Olea, A., & Aracena, A. (2023). "Manufactura aditiva en metales". <https://doi.org/10.58011/edm5-fz43>
- Pérez, S. (2024). *Análisis del Ciclo de Vida comparativo de la fabricación aditiva frente a la sustractiva* [Pregrado, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/68898>
- Pilataxi, D. W. (2024). *Fabricación de una caja de cambios CVT mediante el proceso de manufactura aditiva FMD como material didáctico para ingeniería automotriz*. <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/5202>
- Quiceno, J. C. (2024). *Evaluación del desarrollo de autopartes personalizadas utilizando procesos de manufactura aditiva*. <https://red.uao.edu.co/entities/publication/dc943464-31c2-4ac9-9077-bf45b00ea816>
- Ren, P., Ouyang, Y., Mu, J., Luo, S., Tang, Z., Wu, Y., Leung, C. L. A., Oliveira, J. P., Zou, Y., Wang, H., & Wang, H. (2025). Metal powder atomization preparation, modification, and

- reuse for additive manufacturing: A review. *Progress in Materials Science*, 152, 101449.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101449>
- Romero, S. (2017). *Estudio comparativo de los métodos de fabricación aditiva para el titanio y sus aleaciones* [Pregrado, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona].
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/114428/Estudio%20Comparativo%20de%20los%20M%C3%A9todos%20de%20Fabricaci%C3%B3n%20Aditiva%20para%20el%20Titanio%20y%20sus%20Aleaciones.pdf>
- Salas, A. E., & Altamirano, G. (2025). Emerging Ferrous Alloys. En S. J. Ikhmayies (Ed.), *Advances in Alloys Research and Technologies* (pp. 1-40). Springer Nature Switzerland.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-57499-3_1
- Sánchez, C. (2024). *Fabricación Aditiva de Materiales Compuestos con Matrices Metálicas de Ti6Al4V y Refuerzo Cerámico In-situ y Ex-situ* [Universidad Rey Juan Carlos].
<https://hdl.handle.net/10115/79177>
- Sierra, I. C. (2023). *Influencia del tiempo y temperatura de sinterización en la calidad superficial de componentes de acero obtenidos mediante manufactura aditiva basada en extrusión* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85022>
- Singh, S., Suthar, R., Tomimatsu, A., Rani, P., Matsushita, M. M., Awaga, K., & Karak, S. (2025). Ultrafast Highly Sensitive Self-Powered MSIM Photodetector Based on Organic Semiconductor/Dielectric Interfaces for Broadband Visible to Near-Infrared Communication. *Advanced Functional Materials*, n/a(n/a), 2425426.
<https://doi.org/10.1002/adfm.202425426>

- Sivaraj, L., Muralidharan, N., Kalaiselvan, K., & Karthikeyan, A. G. (2025). Production and analysis of additively manufactured SS316L using Direct Metal Laser Sintering (DMLS) technique based on hybrid Taguchi-Grey grade relational analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, *141*, 976-990. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.075>
- Srivastava, M., Rathee, S., Tiwari, A., & Dongre, M. (2023). Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. *Materials Chemistry and Physics*, *294*, 126988. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126988>
- UNE, N. E. (2017). *UNE-EN ISO/ASTM 52921:2017 Terminología normalizada para la fa...* UNE Normalización Española. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058449>
- Wang, K., Liu, Y., Sun, Z., Lin, J., Lv, Y., & Xu, B. (2020). Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 718 superalloy thin wall fabricated by pulsed plasma arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, *819*, 152936. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152936>
- Zhang, D., Feng, Z., Wang, C., Wang, W., Liu, Z., & Niu, W. (2018). Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 alloy processed by selective laser melting and casting. *Materials Science and Engineering: A*, *724*, 357-367. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.073>
- Zhong, C., Liu, J., Zhao, T., Schopphoven, T., Fu, J., Gasser, A., & Schleifenbaum, J. H. (2020). Laser Metal Deposition of Ti6Al4V—A Brief Review. *Applied Sciences*, *10*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app10030764>

Apéndices

Apéndice A

Ejemplo Cuadro de Síntesis de Documentos MA

País	Año	Tipo de Estudio	Título del Estudio	Categoría/Dimensión	Resultados o Datos Estadísticos	Aportes al Estado del Arte
Internacional	2025	Artículo	An Investigation of the Processing-Microstructure-Property Trinomial in the Production of High-Wear-Resistant Coatings by Multi-Material L-DED	Procesos y Materiales	Estudia el L-DED en la producción de recubrimientos de alta resistencia al desgaste	Avanza el conocimiento en materiales resistentes en manufactura aditiva
EE.UU.	2025	Artículo	Eddy current testing and monitoring in metal additive manufacturing: A review	Control de Calidad	Evaluación de defectos en manufactura aditiva	Métodos avanzados de inspección no destructiva en AM
EE.UU.	2025	Tesis	Enhanced Intellectual Property Protection Mechanisms Towards Collaborative Data Sharing in Metal-Based Additive Manufacturing	Seguridad y Propiedad Intelectual	Nuevas estrategias de protección de datos en AM	Desarrollo de marcos legales para AM
Rusia	2025	Artículo	Impact of laser hardening on surface properties of billets from structural materials	Tratamientos Superficiales	Explora el endurecimiento láser en aceros estructurales	Mejora de propiedades superficiales en AM
EE.UU.	2025	Artículo	Sintering Mechanisms in Metal Extrusion-based	Procesos de Sinterización	Revisión de los mecanismos de	Estado del arte y nuevas

			Sintering-assisted Additive Manufacturing		sinterización en AM de metales	perspectivas en sinterización
Internacional	2025	Artículo	Additive Friction Stir Deposition for Aluminum Alloys in Aerospace Applications	Aplicaciones Aeroespaciales	Descripción del uso de AM en aleaciones de aluminio	Innovación en manufactura aditiva para la industria aeroespacial
España	2025	Artículo	An innovative smart monitoring system for DED-LB/MW process stability based on machine learning techniques	Monitoreo Inteligente	Uso de aprendizaje automático para monitorear estabilidad en DED-LB/MW	Optimización y control de calidad en AM
Japón	2025	Artículo	Ultrafast Highly Sensitive Self-Powered MSIM Photodetector Based on Organic Semiconductor/Dielectric Interfaces	Fotodetectores en AM	Revisión de sensores avanzados para monitoreo en AM	Aplicaciones en control de calidad y monitoreo en AM
Alemania	2025	Artículo	New Island Partitioning to Improve Scanning Strategies in Powder Bed Fusion of Metals with Laser Beam	Optimización de Estrategias de Escaneo	Reducción de defectos en Powder Bed Fusion	Avances en manufactura aditiva de precisión
Italia	2025	Tesis	Exploring the Photoluminescence and Structural insights of MIL-53 (Al) Metal-Organic Framework Under Multi-Stimulus Environment	Materiales Innovadores	Evaluación de nuevos marcos metal-orgánicos	Innovaciones en materiales para AM