



Universidad del Valle

**Obtención de un impeller mediante el uso de la
técnica Metal Binder Jetting con acero inoxidable
martensítico**

Jose Francisco Hoyos Hoyos

Universidad del Valle
Escuela de Ingeniería Mecánica
Cali, Colombia
Febrero 2026



Universidad del Valle

**Obtención de un impeller mediante el uso de la
técnica Metal Binder Jetting con acero inoxidable
martensítico**

Jose Francisco Hoyos Hoyos

*Trabajo de grado presentado como requisito para optar al
título de Ingeniero Mecánico*

Director:

Ph. D. Fernando Franco Arenas

Codirector:

Ing. Carlos Vidal

Universidad del Valle
Escuela de Ingeniería Mecánica
Cali, Colombia
Febrero 2026

DEDICATORIA

A mi mamá, por inculcarme el amor por el estudio y la motivación para mejorarme constantemente. Sin su excelente formación y apoyo incondicional no sería quien soy hoy.

A mi expareja y compañera Camila Polanco, por estar ahí conmigo en cada momento de la carrera, brindarme su amor y dedicación a pesar de las adversidades.

Agradecimientos

Mi mas sincera gratitud a todos y cada una de las personas que contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por ser la cuna de mi formación personal y profesional.

A la Escuela de Ingeniería de Materiales y sus laboratorios, por abrirme las puertas y permitirme llevar a cabo este trabajo.

A mi director, Fernando Franco, por ofrecerme la oportunidad de trabajar en este proyecto.

A mi codirector, Profesor Carlos Hugo Vidal, por su guía constante, la confianza depositada en permitirme desenvolverme libremente tanto en el LIDMMA como en las diferentes dependencias de la Escuela, por compartir su conocimiento, tiempo y dedicación. Su orientación y consejos críticos fueron claves para la realización de este proyecto.

A todos mis compañeros que aportaron sus valiosos comentarios y sugerencias para este proyecto.

Muchas gracias.

Resumen

En esta investigación se implementó una ruta experimental de manufactura aditiva Metal Binder Jetting (MBJ) para fabricar un impeller automotriz en acero inoxidable martensítico empleando polvo METCO 42C, un material originalmente diseñado para procesos de thermal spray. Se desarrolló un Script de segmentación en Python capaz de generar patrones de deposición línea a línea a partir de archivos STL, controlando parámetros como altura de capa, tasa de extrusión, velocidad de desplazamiento y espaciado lineal. Se implementó una mejora en el cabezal de impresión, previniendo fugas y acumulación de aglutinante en la boquilla. Se fabricaron probetas de tracción e impacto según ASTM E8 y métodos Charpy/Izod, y posteriormente se sometieron junto con la pieza principal a un proceso de sinterización a 1300 °C.

Aunque el proceso de impresión mostró precisión posicional adecuada en la deposición del Binder, se detectó infiltración lateral de este, engrosamiento de álabes y cierre parcial del orificio central del impeller. Durante la sinterización, se evidenció heterogeneidad térmica severa, produciendo grietas profundas en la pieza y zonas completamente sin sinterizar. Las probetas mecánicas presentaron baja resistencia a tracción (máx. 10 MPa), mínima energía absorbida en impacto y dureza promedio de 50 HRA, resultados atribuibles a la baja densificación alcanzada y a la porosidad interna presente, observada mediante microscopía.

Los hallazgos permiten concluir que la plataforma experimental logró validar parcialmente la viabilidad geométrica del proceso, pero no alcanzó consolidación suficiente debido a la morfología del polvo, la naturaleza del binder y las condiciones térmicas. Se presentan recomendaciones operativas y de infraestructura para avanzar hacia una implementación robusta de MBJ en la Universidad del Valle.

Palabras clave: Manufactura aditiva, Impresión 3D, Metal Binder Jetting, acero inoxidable, impeller.

Abstract

In this research, an experimental workflow for Metal Binder Jetting (MBJ) additive manufacturing was implemented to produce an automotive impeller in martensitic stainless steel using METCO 42C powder, a material originally designed for thermal spray processes. A Python-based slicing script was developed, capable of generating line-by-line deposition patterns from STL files while controlling parameters such as layer height, extrusion rate, travel speed, and linear spacing. An improvement to the printing head was implemented to prevent leakage and binder accumulation at the nozzle. Tensile and impact specimens were fabricated according

to ASTM E8 and Charpy/Izod methods, and subsequently sintered together with the main part at 1300 °C.

Although the printing process exhibited adequate positional accuracy in binder deposition, lateral binder infiltration was detected, along with thickening of impeller blades and partial closure of the central shaft hole. During sintering, severe thermal heterogeneity was observed, resulting in deep cracks in the component and regions that remained completely unsintered. The mechanical test specimens showed low tensile strength (max. 10 MPa), minimal impact energy absorption, and an average hardness of 50 HRA—results attributable to insufficient densification and internal porosity, as confirmed by microscopy.

The findings indicate that the experimental platform partially validated the geometric feasibility of the process but did not achieve adequate consolidation due to the powder morphology, the characteristics of the binder, and the thermal conditions. Operational and infrastructural recommendations are presented to support the development of a robust MBJ implementation at Universidad del Valle.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, Metal Binder Jetting, stainless steel, impeller.

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Árbol del problema	3
1.4. Estado del Arte	3
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Manufactura aditiva	7
2.1.1. Manufactura aditiva en metales	7
2.1.2. Flujo de trabajo típico en un proceso de manufactura aditiva en metales	8
2.1.3. Clasificación de procesos de manufactura aditiva en metales	9
2.2. Metal Binder Jetting (MBJ)	9
2.3. Pulvimetalurgia	11
2.3.1. Naturaleza del material pulverulento	11
2.3.2. Morfología de las partículas	12
2.3.3. Distribución del tamaño de partícula	13
2.3.4. Fluidéz del material de trabajo	13
2.3.5. Sinterizado	14
2.4. Silicato de Sodio como Binder	14
2.4.1. Relación $SiO_2 : NaO_2$	15
2.4.2. Propiedades fisicoquímicas relevantes	15
2.4.3. Mecanismo de endurecimiento	16
2.4.4. Compatibilidad con partículas metálicas	16
2.4.5. Debinding térmico	16
3. Metodología	17
3.1. Revisión Bibliográfica Continua	17
3.2. Caracterización del material de trabajo	17
3.2.1. Ficha técnica	17
3.2.2. Morfología	17
3.2.3. Distribución del tamaño de partícula	17
3.2.4. Curva de sinterización	18
3.3. Diseño de modelos	19
3.4. Segmentación de los modelos 3D - Slicer Slicer propio	19

3.4.1.	Diagrama de flujo	20
3.5.	Revisión y ajuste del equipo	20
3.6.	Preparación del Binder	22
3.7.	Obtención de piezas	22
3.8.	Caracterización de las propiedades mecánicas	22
4.	Resultados y análisis	24
4.1.	Caracterización del material	24
4.1.1.	Ficha técnica	24
4.1.2.	Morfología	25
4.1.3.	Distribución de tamaño de partícula	26
4.1.4.	Temperatura de Sinterización	27
4.2.	Diseño de modelos	30
4.3.	Resultados del proceso de segmentación	30
4.4.	Revisión y ajuste del equipo	31
4.4.1.	Limpieza y mantenimiento	31
4.4.2.	Cabezal de impresión	32
4.4.3.	Ajuste para la impresión	32
4.5.	Obtención de piezas	34
4.5.1.	Resultados de impresión 3D mediante Metal Binder Jetting . .	34
4.5.2.	Resultados de la sinterización	36
4.6.	Caracterización de las propiedades mecánicas	39
4.6.1.	Ensayo de tracción	39
4.6.2.	Prueba de impacto	40
4.6.3.	Medición de dureza	42
4.7.	Anotaciones	43
5.	Conclusiones	45
5.1.	Oportunidades de mejora	46
Bibliografía		47
5.2.	Código del segmentador	54

Lista de figuras

1.1.	Árbol del problema.	3
1.2.	Árbol de objetivos.	6
2.1.	Etapas de la manufactura aditiva con metal [10].	8
2.2.	Esquema de las etapas en el proceso MBJ [12].	10
2.3.	a) Esquema de un equipo típico de MBJ, b) Cabezal [10].	10
2.4.	Representación esquemática de varias formas de partícula [18].	12
2.5.	La densidad de empaquetamiento de la mezcla bimodal depende de la fracción de polvo grueso cuando la relación de tamaño de partícula del componente es 0,1 y la densidad de empaquetamiento de los polvos finos y gruesos es 63,7 % [13].	13
2.6.	(a) Esquema del mecanismo de unión de las partículas de polvo, (b) Cuatro etapas de densificación de las partículas de sinterización (i) temperatura ambiente (ii) Crecimiento del cuello - unión inicial (iii) Redondeo de los poros - los cuellos se fusionan para formar poros tubulares (iv) Cierre de los poros - Crecimiento de grano con cierre de los poros.[10].	14
2.7.	Reacción de una solución acuosa de Silicato de Sodio con CO ₂ [26].	16
3.1.	Equipo utilizado para las pruebas de sinterización.	18
3.2.	Curva de sinterización propuesta.	19
3.3.	Diagrama de flujo Script segmentador.	21
4.1.	Diagrama binario de fases Hierro - Cromo. [33]	25
4.2.	Morfología del material de trabajo	25
4.3.	Metalografía del material en polvo.	26
4.4.	Curva granulométrica obtenida.	26
4.5.	Polvo de acero inoxidable martensítico compactado.	27
4.6.	Microscopía a 400x de la muestra sinterizada de la primer prueba.	28
4.7.	Microscopía de la probeta en la tercera sinterización. Se observa continuidad y la formación de uniones tipo cuello entre las partículas metálicas.	28
4.8.	Curva de sinterización.	29
4.9.	Modelos generados en AutoDesk Inventor	30
4.10.	Visualización del G-Code generado en el segmentador.	31
4.11.	G-code cargado en Repetier Host.	31
4.12.	Mejora en el cabezal de impresión.	32
4.13.	Desde la parte superior derecha hasta la esquina inferior izquierda se observa el avance en los ajustes del cabezal hasta los mejores resultados.	33
4.14.	Pruebas de deposición de Binder con el material de trabajo.	33

4.15. Pieza en verde construida para evaluar la adherencia del Silicato en las partículas metálicas.	34
4.16. Impresión en verde, pieza de prueba.	35
4.17. Vista al estereoscopio. superficie de pieza impresa, en verde.	35
4.18. Impresión en verde de la pieza Impeller.	36
4.19. Preparación de piezas para la sinterización.	36
4.20. Piezas extraídas.	37
4.21. Ruptura de álabe en la pieza impeller.	37
4.22. Vista al estereoscopio del segmento fracturado.	38
4.23. Vista al estereoscopio de la pieza de prueba seccionada.	39
4.24. Curvas Esfuerzo deformación obtenidas.	40
4.25. Ruptura de álabe en la pieza impeller.	41
4.26. Impresión en verde de la pieza Impeller.	42

Lista de tablas

2.1. Categorización de los procesos de manufactura aditiva con metales y sus aplicaciones [11].	9
2.2. Variación de propiedades de acuerdo con la relación molar. Modificado de [22]	15
4.1. Ficha técnica del material de trabajo.	24
4.2. Distribución porcentual de tamaño de partícula.	27
4.3. Temperaturas establecidas para la curva de sinterización.	29
4.4. Resultados ensayo Izod.	41
4.5. Valores de dureza obtenidos.	42

Capítulo 1

Introducción

El sector automotriz es uno de los pilares más importantes a nivel global, tanto en el ámbito de la ingeniería como en el comercial. La constante innovación y la implementación de nuevas tecnologías son fundamentales para que las organizaciones mantengan su competitividad en un mercado tan dinámico. En este contexto, la Industria 4.0 juega un papel clave en la modernización de la fabricación automotriz [1]. El proceso de diseño de un automóvil es multidisciplinario: aunque el objetivo general es producir un vehículo completo, cada componente individual constituye un subproyecto independiente dentro del desarrollo integral.

Durante la etapa de investigación y desarrollo (I+D), el prever las demandas del mercado futuro y preparar las líneas de producción para fabricar miles de piezas es un aspecto crucial, ya que este proceso involucra la adquisición de maquinaria, la programación de plantas automatizadas y la implementación de distintos métodos de manufactura, como la fundición, el conformado y la soldadura. Estos procesos tienden a ser inflexibles, y una sola pieza puede requerir una cadena de montaje específica [2]. Esta rigidez impone restricciones en el diseño, lo que puede limitar la capacidad de optimizar las prestaciones del vehículo. A menudo, los diseños más eficientes poseen geometrías complejas que no pueden ser fabricadas mediante métodos convencionales de manufactura.

Además, algunos vehículos pueden no requerir ciertos repuestos durante todo su ciclo de vida, lo que hace económicamente inviable mantener una línea de producción dedicada a estas piezas. Esto obliga a los usuarios a recurrir al mercado de segunda mano, o a adquirir repuestos de calidad cuestionable. Los propietarios de vehículos discontinuados enfrentan aún mayores dificultades para encontrar piezas, quedando con pocas opciones como la refabricación o, en el peor de los casos, adaptaciones no óptimas. Este mismo problema afecta la personalización de los vehículos, que está limitada por la disponibilidad de piezas en el mercado, impidiendo una verdadera customización [3].

La Manufactura Aditiva (AM, por sus siglas en inglés) representa una solución significativa para la manufactura y la industria automotriz, ya que permite potenciar tanto el diseño como la producción de piezas al eliminar las restricciones impuestas por los métodos de manufactura tradicionales, ya que reduce el tiempo dedicado a la investigación y desarrollo, lo que acelera la comercialización de los productos. Esta reducción de tiempos permite a los investigadores centrarse en mejorar los diseños, resultando en vehículos más eficientes en términos de consumo de combustible, con mejor desempeño y menores costos de producción.

La manufactura aditiva también facilita la creación de piezas personalizadas y herramientas que, en el pasado, habrían sido demasiado costosas. Las líneas de producción se vuelven más flexibles, lo que permite a los fabricantes responder rápidamente a cambios en el diseño, producir piezas para aplicaciones poco comunes o fabricar componentes de dispositivos descontinuados sin necesidad de invertir en nuevas cadenas de producción.

En el ámbito de la ingeniería, el material más utilizado sigue siendo el acero, debido a sus buenas propiedades mecánicas, su bajo costo y la facilidad para ser procesado. Un derivado del acero es el acero inoxidable martensítico, que, gracias a su alto contenido de Cromo y Níquel, presenta una excelente resistencia a la corrosión y una dureza superior. Sin embargo, este material es de baja maquinabilidad, lo que dificulta la fabricación de piezas mediante métodos convencionales, siendo la Manufactura Aditiva una solución a medida para el uso de este material.

El avance tecnológico en manufactura aditiva ha llegado a la Universidad del Valle a nivel comercial, permitiendo el uso de impresoras 3D para materiales poliméricos como el ácido poliláctico (PLA) y resinas. No obstante, la manufactura aditiva en metales aún se encuentra restringida en esta institución, debido a los altos costos de los equipos que requieren fuentes de alta potencia, como láseres acoplados a sistemas mecatrónicos complejos. El proceso de manufactura aditiva con polvo metálico más aplicable en términos de costo es el Metal Binder Jetting, ya que no requiere llevar los materiales al punto de fusión y el equipo utilizado posee una complejidad menor.

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, la Universidad del Valle no cuenta con procesos de manufactura aditiva para metales, utilizando acero inoxidable como material de producción, lo cual representa un atraso técnico y académico frente a otras instituciones de la región que sí cuentan con equipos de esta índole. Sin embargo, la implementación del método Metal Binder Jetting resulta viable, especialmente considerando los recursos disponibles. Desde las escuelas de Ingeniería de Materiales e Ingeniería Mecánica, la Universidad del Valle puede contribuir al desarrollo de este proceso, estudiando y aplicando manufactura aditiva en acero, lo que representa no solo una oportunidad de mejora a nivel local, sino que también permite la formación de profesionales capaces de competir en el exigente mercado laboral.

La limitada implementación de procesos de manufactura aditiva con metales en la institución restringe las oportunidades de formación práctica avanzada, la participación en proyectos de innovación y el desarrollo de investigación aplicada en esta área. Esta situación puede afectar el interés, la proyección académica y la permanencia de los estudiantes en líneas de investigación afines a la manufactura avanzada, al no contar con plataformas experimentales comparables a las de otras instituciones.

1.2. Justificación

Teniendo en cuenta la relevancia del sector automotriz en la región, este trabajo propone fabricar un Impeller para el sistema refrigerante de un vehículo mediante la

técnica de Metal Binder Jetting. De este modo, se busca sentar un precedente en este campo de estudio, con grandes posibilidades de continuar con trabajos posteriores, así, la Universidad del Valle no solo avanzará en el campo de las nuevas tecnologías, sino que también fortalecerá la enseñanza en cursos como Procesos de Manufactura y Procesos de los Metales, contribuyendo al fortalecimiento de esta línea de investigación. La consolidación de capacidades en tecnologías avanzadas puede favorecer el interés y la vinculación de estudiantes a proyectos de investigación y desarrollo, evitando la necesidad de buscar estas oportunidades en otras instituciones.

1.3. Árbol del problema

Con el objetivo de presentar de manera clara y estructurada la relación lógica que conecta las causas con los efectos en el desarrollo de este trabajo, la Figura 1.1 ilustra el diagrama del árbol del problema. Este representa las causas esenciales e indirectas que lo originan, así como sus manifestaciones y consecuencias.



Figura 1.1. Árbol del problema.

1.4. Estado del Arte

Como se mencionó anteriormente, las mejores prestaciones que corresponden al diseño óptimo de una pieza están asociadas a geometrías complejas difíciles de obtener mediante los procesos de manufactura convencionales. Con la implementación de la manufactura aditiva en sus líneas de producción, BMW ha sido pionero en este

aspecto, siendo capaz de obtener piezas de alto rendimiento, como aquellas utilizadas en eventos deportivos de alta exigencia. En el año 2015 ya presentó el primer modelo de un impeller obtenido mediante manufactura aditiva en aluminio para el sistema de refrigeración del motor, componente utilizado en uno de sus vehículos en la German Touring Car Masters[4].

Inicialmente se piensa en el uso de la manufactura aditiva para la obtención de piezas finales, pero una posibilidad es utilizarla para la creación de herramientas o medios que permitan la obtención de una pieza final por la integración de dos métodos de manufactura. Teniendo en cuenta las restricciones geométricas que tiene el proceso de fundición para la elaboración de moldes, se llevó a cabo un estudio en Tarragona España [5] en el cual se fabricó el molde mediante Binder Jetting, para posteriormente fundir la pieza en acero inoxidable AISI 316. La pieza resultante con las mejoras geométricas propuestas presentó un menor consumo de potencia comparado con el modelo actual, lo cual a largo plazo representa ahorro en costos.

En el trabajo llevado a cabo por Sufiarov, Polozov, Kantykov et al. [6] se manufacturaron especímenes de acero inoxidable tipo AISI 420 con el método MBJ, que luego son sometidas a curado, sinterizado, finalmente a temple y revenido. La sinterización se lleva a cabo en 3 diferentes tiempos (1h, 2h y 2.5h) con el fin de evaluar los cambios en las características de las muestras, principalmente la densidad aparente respecto al estado inicial en verde. La dureza y la resistencia son evaluadas después del tratamiento térmico, en donde se obtiene una dureza de $HV_{0.2} 546 \pm 6$. Si bien es un estudio enfocado principalmente en las propiedades mecánicas resultantes de las piezas y no tanto en la reducción volumétrica, que puede observarse de manera indirecta en los valores de densidad aparente, brinda información relevante sobre los factores que afectan las propiedades mecánicas finales, los cuales se deben tener en cuenta en posteriores estudios más completos, en donde las tolerancias de las piezas finales sean el foco del problema.

Si bien se conoce que inicialmente las propiedades mecánicas obtenidas por el método MBJ no son comparables a aquellas obtenidas por métodos convencionales, la implementación de nuevas técnicas dentro del proceso ha resultado ser beneficioso en tanto las propiedades resultan ser realmente buenas [7]. En este estudio, se desarrolla un nuevo método en el cual las muestras obtenidas de acero inoxidable tipo AISI 420 obtienen propiedades similares e incluso mejores que las de sus contrapartes rodadas en frío (CR). La principal modificación respecto al método estándar es la adición de diferentes tamaños de partícula y Nitruro de Boro como aditivo de sinterización. Los elementos en verde son curados y posteriormente sinterizados. Una etapa intermedia de quema del aglutinante es añadida para evaluar los resultados en algunas piezas. Las muestras son diseñadas evitando una concentración de esfuerzos significativa haciendo uso de ANSYS, ante la imposibilidad de fabricar probetas de acuerdo al estándar ASTM por la limitación del equipo. Se sometieron a ensayos de tensión y pruebas de fatiga, análisis de micro estructura y se halló su módulo de elasticidad. La densidad relativa obtenida de las muestras fue mayor a la presente en las muestras CR. Las características de las muestras obtenidas las hacen idóneas para su uso estructural. Para este proceso en específico se determinó que la contracción lineal es del 15 %, aspecto a tener en cuenta para un diseño íntegro utilizando este método.

Ya que las fases resultantes en un material ferroso se pueden modificar vía tratamientos térmicos, Wang, Liu, Fan et al. [8] llevan a cabo un experimento en el cual se

evalúan las propiedades mecánicas obtenidas luego de someter las piezas fabricadas por Binder Jetting a templado y revenido. Después de aplicados los tratamientos se observó que la mayor parte de la austenita retenida se transformó en martensita, característica micro estructural que le confiere una mayor resistencia última, pasando de 657 MPa a 1032 MPa. Se demuestra así que los tratamientos térmicos son una etapa a tener en cuenta para la fabricación de piezas mediante Binder Jetting, toda vez que buenas propiedades mecánicas sean requeridas.

Cada proceso de manufactura posee características específicas, con lo cual los lineamientos de un proceso no pueden aplicarse a otro. Blunk y Seibel [9] elaboraron una guía de diseño para el proceso Metal Binder Jetting con un material del tipo acero inoxidable martensítico. En esta se tienen en cuenta aspectos geométricos que limitan la producción de piezas, teniendo valores máximos y mínimos para evitar distorsiones y garantizar buenos resultados. Aspectos como diseño de cuboides, agujeros, cilindros, elipsoides, voladizos o brazos, aristas (filetes) y espacio entre elementos son incluidos en esta guía mediante la elaboración de diversas muestras con diferentes geometrías, cada grupo de estas construido de acuerdo al aspecto a evaluar. Con este trabajo se afirmaron algunos escasos lineamientos existentes para el Binder Jetting, y agregaron nuevos elementos de guía.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Obtener un impeller para la bomba de refrigerante automotriz mediante el desarrollo e implementación de la técnica de manufactura aditiva Metal Binder Jetting, empleando polvo de acero inoxidable martensítico.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Definir las mejores condiciones para el proceso de impresión 3D mediante la caracterización del material, con el fin de garantizar la calidad y estabilidad de la pieza en su estado verde.
2. Determinar condiciones adecuadas de sinterizado en función de las propiedades físicas y mecánicas del material, para garantizar la calidad estructural y funcional del producto final.
3. Manufacturar el nuevo impeller, asegurando el uso adecuado de equipos calibrados y acondicionados para obtener resultados confiables y reproducibles.
4. Evaluar las propiedades mecánicas de las probetas con ensayos de tracción, impacto y dureza.

La Figura 1.2 presenta el árbol de objetivos diseñado para abordar y resolver el problema planteado en el proyecto.

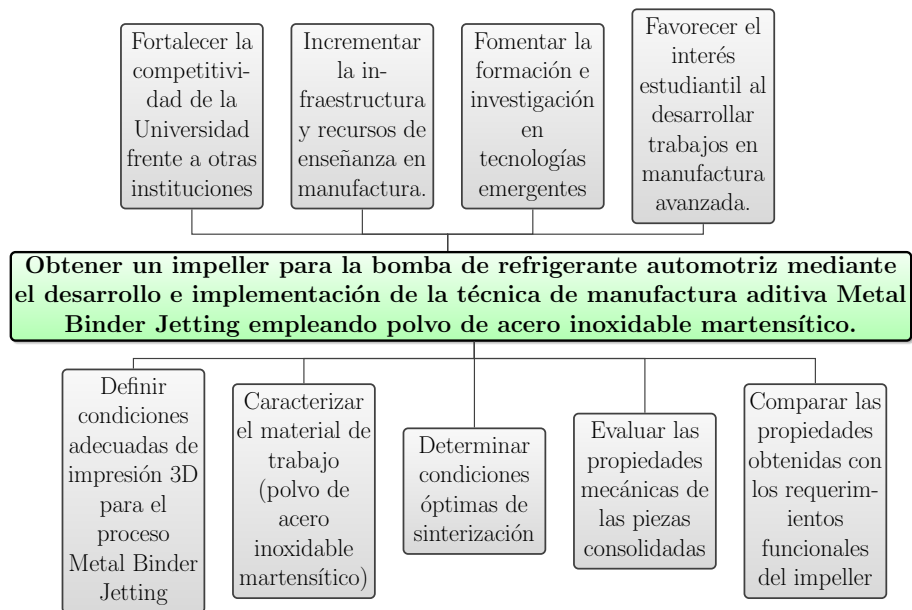


Figura 1.2. Árbol de objetivos.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Manufactura aditiva

La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, es un proceso que ha experimentado un desarrollo acelerado en las últimas décadas, al punto de que esta tecnología está ahora al alcance del público general. Entre las ventajas que este tipo de proceso ofrece en comparación con los métodos convencionales, se destacan:

- Creación de geometrías complejas.
- Producción bajo demanda.
- Flexibilidad del equipo, que permite realizar modificaciones en el diseño CAD sin generar costos adicionales significativos.
- Rápida creación de prototipos.
- Mayor aprovechamiento del material y reducción de desperdicios.
- Transición ágil del prototipado a la producción.

A diferencia de los procesos sustractivos o formativos, la manufactura aditiva construye componentes capa por capa directamente a partir de archivos CAD en 3D, reduciendo la intervención humana y aumentando la precisión.

2.1.1. Manufactura aditiva en metales

Si bien hoy en día se pueden utilizar diferentes materiales para la manufactura de piezas, tales como metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos, el metal es el que ha causado el impacto más significativo en diferentes sectores de la industria tales como el médico, aeronáutico o incluso el de la construcción. Como resultado de variados casos de estudio y aplicaciones, la manufactura aditiva en metales ha tenido una rápida tasa de crecimiento en los últimos años, permitiendo así identificar las principales falencias y desafíos relacionados con la estandarización, la optimización de procesos y la comprensión completa de las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas. Esto subraya la necesidad de investigaciones continuas y revisiones integrales para facilitar su adopción y desarrollo [10].

2.1.2. Flujo de trabajo típico en un proceso de manufactura aditiva en metales

La fabricación de una pieza mediante este proceso involucra diferentes etapas, que pueden variar dependiendo del tipo de pieza y el proceso utilizado. Aquellas piezas que requieran alta precisión, buenos acabados y propiedades mecánicas específicas implican etapas extra en el posprocesamiento. Estas etapas se ilustran de manera breve en la Figura 2.1.

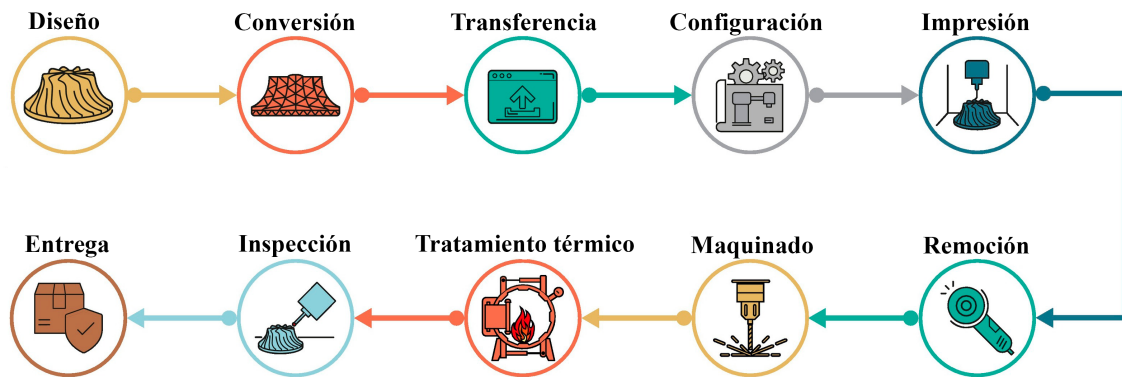


Figura 2.1. Etapas de la manufactura aditiva con metal [10].

Diseño: El inicio de cualquier pieza impresa en 3D empieza con un modelo CAD que representa el modelo físico, conteniendo todas las características geométricas requeridas.

Conversión: Una vez que se tiene el diseño CAD, este debe convertirse a un formato de teselado estandar (STL), con el fin de garantizar la compatibilidad de diferentes plataformas. Este proceso puede realizarse en el mismo entorno de diseño.

Transferencia: El archivo STL es transferido a una plataforma que segmenta el modelo en capas 2D, usadas para indicar la ruta de construcción o el G-Code necesario para manufacturar la pieza.

Configuración: Previo a la impresión, se deben ajustar los parámetros del proceso tales como la altura de capa, la inclusión de soportes, entre otros. Estos parámetros pueden ajustarse en el software segmentador.

Impresión: Este proceso puede variar mucho de acuerdo a la tecnología que se utilice. De acuerdo con la geometría y las dimensiones de la pieza, la impresión es el proceso que más demanda tiempo, desde minutos hasta días incluso. Aún así, es el proceso que menos intervención humana requiere, exceptuando la supervisión intermitente del proceso.

Remoción: Una vez que las piezas son fabricadas se pueden remover de la cámara de construcción. Dependiendo del proceso aquí se pueden someter a quema de aglutinante o sinterización para lograr la densificación de la pieza. Hasta aquí se tienen las etapas básicas de un proceso de manufactura aditiva en metal.

Maquinado: Dependiendo de la aplicación de la pieza, puede incluirse un proceso de maquinado para ajustar tolerancias y lograr acabados superficiales. Estructuras de soporte y relleno se eliminan en esta etapa.

Tratamiento térmico: Dependiendo del proceso utilizado se pueden presentar ciclos térmicos que derivan en esfuerzos residuales, con lo cual un alivio de tensiones puede ser necesario. Diferentes tratamientos térmicos pueden ser utilizados aquí para adaptar las propiedades mecánicas de la pieza de acuerdo con las condiciones de uso.

Inspección: Las partes obtenidas pueden ser sometidas a ensayos no destructivos con el fin de determinar la presencia de defectos, como la inspección visual detallada, tintas penetrantes o ultrasonido.

Entrega: Finalmente, y de acuerdo a la cadena operativa, un correcto embalaje y transporte de las piezas obtenidas puede ser implementado.

2.1.3. Clasificación de procesos de manufactura aditiva en metales

De acuerdo con la norma ASTM/ISO 52900:2017, se definen cuatro categorías de procesos, listados en la Tabla 2.1.

Proceso	Abreviación	Modo	Aplicaciones típicas
Extrusión de material	ME	El material es depositado selectivamente a través de una boquilla.	Partes metálicas funcionales y de prototipado.
Binder Jetting	BJ	Un aglutinante es depositado selectivamente para unir materiales en polvo.	Partes metálicas funcionales, componentes no críticos.
Deposición de Energía Directa	DED	Energía térmica enfocada es usada para fundir materiales mientras son depositados.	Partes metálicas funcionales, reparaciones, adición de material a partes existentes.
Fusión en cama de polvo	PBF	Energía térmica funde selectivamente regiones de una cama de polvo.	Partes metálicas funcionales y de prototipado.

Tabla 2.1. Categorización de los procesos de manufactura aditiva con metales y sus aplicaciones [11].

El presente trabajo se desarrolla utilizando el método Binder Jetting aplicado a metales, conocido como MBJ por sus siglas en inglés.

2.2. Metal Binder Jetting (MBJ)

En la Figura 2.2 se muestra un esquema del proceso estándar Metal Binder Jetting. El equipo consiste en un reservorio de material en polvo, un rodillo distribuidor de capas de polvo, la cama de trabajo y el cabezal de impresión (Figura 2.3), que

realiza los movimientos en el plano X,Y. El desplazamiento en el eje Z lo realiza la cama de trabajo en sentido descendente y el reservorio en sentido ascendente, según se van realizando las capas.

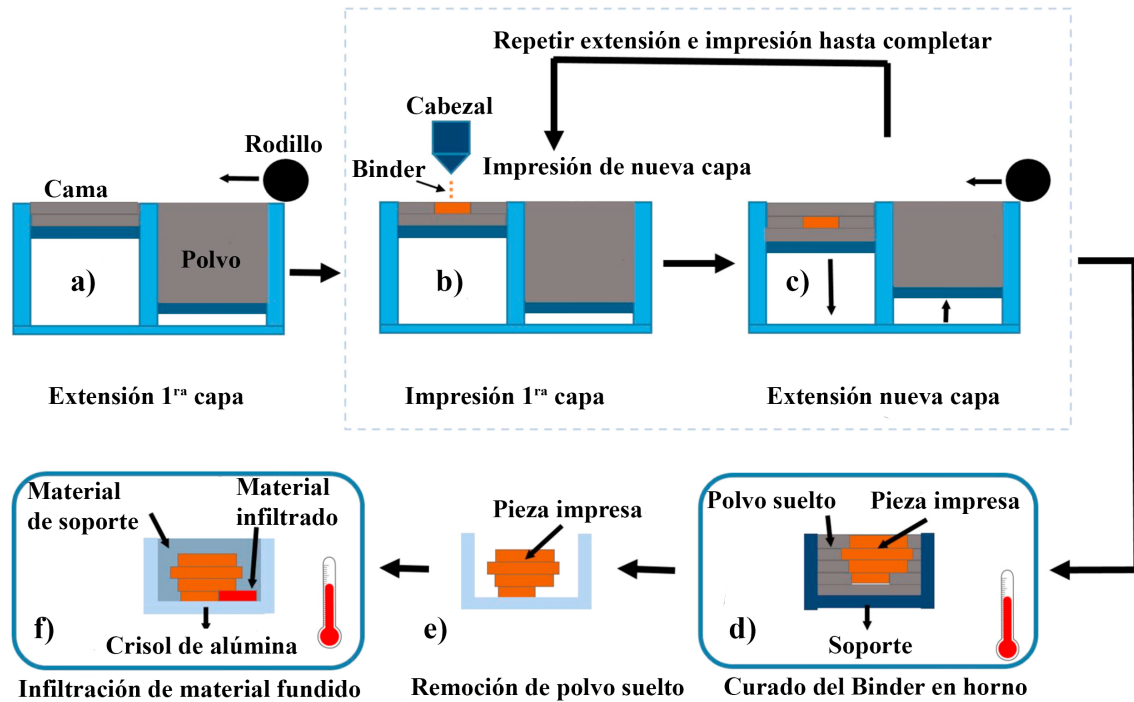


Figura 2.2. Esquema de las etapas en el proceso MBJ [12].

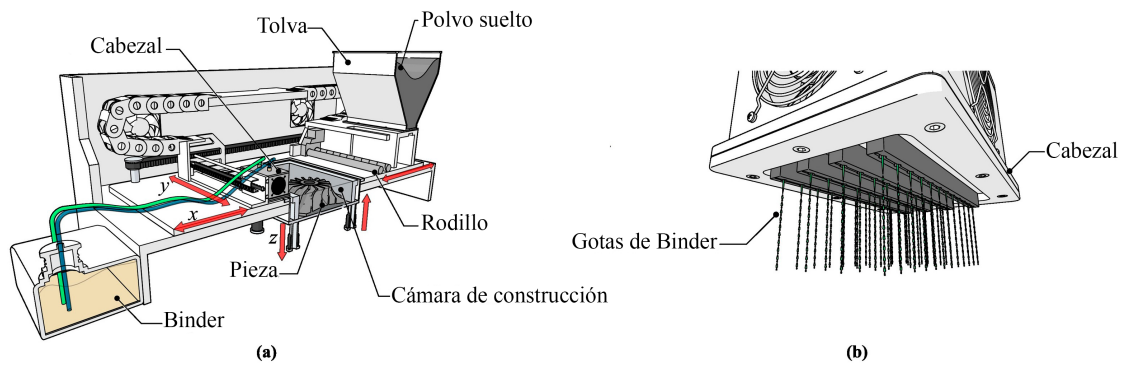


Figura 2.3. a) Esquema de un equipo típico de MBJ, b) Cabezal [10].

- El rodillo distribuye una capa de polvo sobre la cama de trabajo desde el reservorio, con una altura de capa prefijada.
- El cabezal aplica selectivamente el aglutinante de acuerdo al segmento actual.
- La cama de trabajo desciende de acuerdo a la altura de capa y se distribuye una nueva capa de polvo con el rodillo. Este proceso se repite hasta terminar la pieza.
- El aglutinante se cura al elevar la temperatura de la pieza recién conformada.
- Se remueve el polvo no aglutinado y elimina la fase del Binder mediante la sinterización, en la que se consolida la unión de la pieza.

- (f) Un proceso extra de infiltración con metal fundido puede aplicarse, para aumentar la densidad de la pieza.

En el proceso MBJ, el control de la infiltración del aglutinante depende de factores como la morfología del polvo, la distribución de tamaño de partícula, la energía superficial del material y el control de la cantidad de Binder depositado. Materiales de trabajo con partículas irregulares o con una distribución granulométrica homogénea tienden a favorecer la capilaridad y la difusión del aglutinante más allá del volumen inicialmente depositado, afectando la resolución de la pieza impresa [13], [14].

El empleo de acero inoxidable martensítico en el proceso Metal Binder Jetting incluye ciertas diferencias respecto a trabajar con otros materiales como el polvo de aleaciones de aluminio o magnesio, esto debido a las características propias de cada material. En ese sentido, las diferencias más notables se encuentran en la etapa de sinterizado, en las que las temperaturas de sinterizado son de 1200°C aproximadamente, con un tiempo de sostenimiento de 2 a 6 horas, con atmósferas controladas en vacío, o empleando Nitrógeno o Argón para evitar la oxidación y la pérdida de las propiedades anticorrosivas del acero inoxidable [6], [7], [12].

2.3. Pulvimetalurgia

La metalurgia de polvos o pulvimetalurgia es un proceso de manufactura que utiliza polvos metálicos, en ocasiones mezclados con polvos no metálicos para fabricar piezas. El proceso incluye etapas como mezclado, compactación, sinterización y algunas operaciones secundarias de maquinado o acabado. La calidad del producto final está directamente relacionado con las características de los polvos iniciales, por ello la etapa de mezcla inicial.

Este proceso se emplea para fabricar desde piezas pequeñas (esferas, engranajes, filtros) hasta componentes de vehículos, que representan el 70 % del mercado actual de pulvimetalurgia. Un automóvil promedio contiene 11 kg de piezas fabricadas por este método, cifra que se espera aumente con el avance de la tecnología. Los metales más usados incluyen hierro, cobre, aluminio, níquel, titanio y prealeaciones.

Este método es competitivo frente a la fundición y el maquinado, ya que permite producir piezas con formas finales o casi finales, reduciendo operaciones adicionales frente a los métodos tradicionales. Sin embargo, sus altos costos iniciales lo hacen viable solo para producciones masivas [15].

2.3.1. Naturaleza del material pulverulento

Existen diferentes métodos para producir polvos metálicos, la elección depende de los requisitos del producto final ya que características como la microestructura, propiedades de la masa, superficie, la pureza química, la porosidad, la forma y distribución del tamaño de las partículas dependen del proceso específico que se usó en la obtención del material particulado [16]. Entre los principales métodos se encuentran:

- Atomización (gas, agua o centrífuga).

- Reducción química (usando gases reductores).
- Deposición electrolítica.
- Pulverización mecánica.
- Aleación mecánica.

2.3.2. Morfología de las partículas

La forma de las partículas del polvo metálico gobierna el proceso MBJ, con lo cual es una de las características principales a tener en cuenta para el uso del material. Esto se debe a la afectación en la densidad de empaquetamiento y las propiedades de flujo [17]. A menudo se desean partículas esféricas en los procesos de manufactura aditiva con metales, ya que las formas de partículas se ajustan y pueden mejorar gradualmente tanto su densidad de empaquetamiento como su comportamiento reológico.

Una clasificación de acuerdo a la dimensionalidad se observa en la Figura 2.4, con partículas unidimensionales con relación de aspecto alargadas, bidimensionales en las que prevalece el largo y el ancho sobre el espesor y las de forma tridimensional.

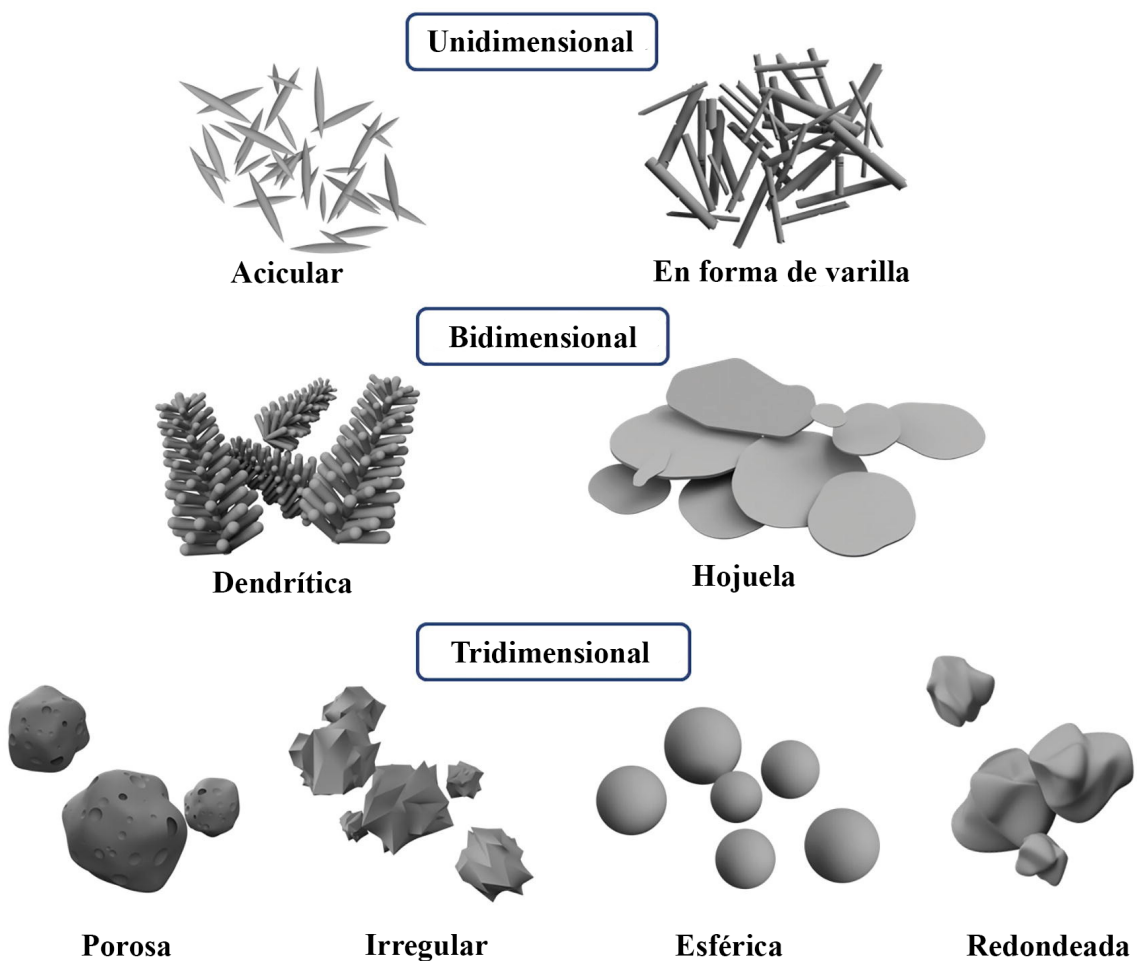


Figura 2.4. Representación esquemática de varias formas de partícula [18].

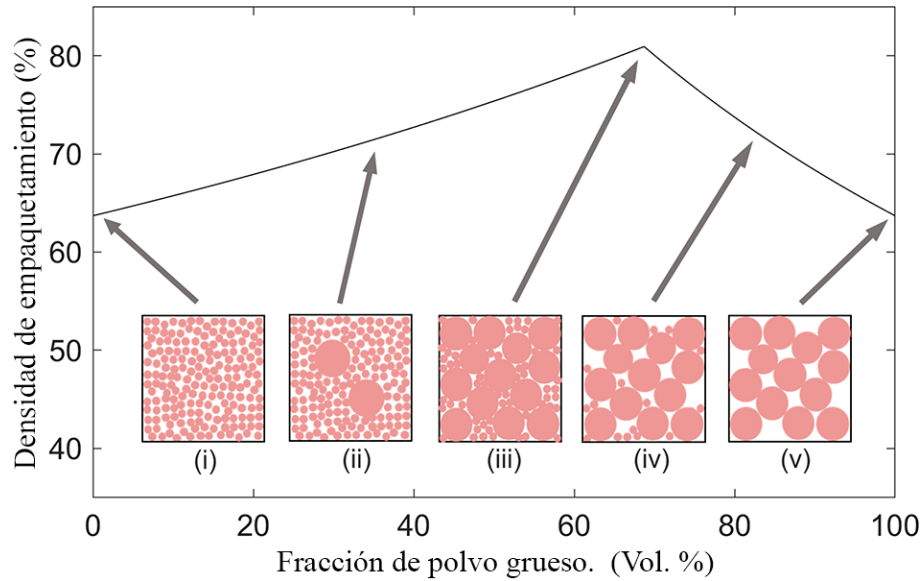


Figura 2.5. La densidad de empaquetamiento de la mezcla bimodal depende de la fracción de polvo grueso cuando la relación de tamaño de partícula del componente es 0,1 y la densidad de empaquetamiento de los polvos finos y gruesos es 63,7 % [13].

2.3.3. Distribución del tamaño de partícula

La distribución de tamaño de partícula es otra característica que afecta la densidad de empaquetamiento del material de trabajo y la densidad aparente de las piezas impresas y terminadas, con lo cual se debe tener presente este aspecto en el material seleccionado. Se debe tener en cuenta también la posibilidad de realizar mezclas de polvos con diferentes tamaños de partículas, lo que aumenta el empaquetamiento, reduce los espacios intersticiales y mejora las propiedades mecánicas [13]. El material a adicionar no tiene que ser necesariamente el mismo que el inicial, ya que otros materiales pueden beneficiar etapas posteriores del proceso, como el sinterizado [19].

Las mezclas bimodales o multimodales resultan ser las que ofrecen la densidad de empaquetado máxima, ya que una distribución de partículas uniforme, ya sea gruesa o fina, reduce la densidad de empaquetamiento, como se observa en la Figura 2.5.

2.3.4. Fluidez del material de trabajo

La fluidez de los polvos es crucial en la manufactura aditiva (AM), especialmente en procesos como el Binder Jetting, ya que determina la capacidad del polvo para extenderse uniformemente sobre el lecho y formar capas homogéneas. Una buena fluidez mejora la resolución, precisión dimensional y densidad de las piezas impresas, mientras que una fluidez deficiente genera capas irregulares y superficies desiguales. Para evaluarla, se emplean métodos como el ángulo de reposo (AoR), analizadores dinámicos como el REVOLUTION, sistemas simulados de extensión y reómetros de polvo.

Factores como la morfología y tamaño de las partículas, junto con condiciones ambientales, afectan significativamente la fluidez. Las partículas esféricas fluyen mejor y permiten mayor densidad de empaque, mientras que las finas ($<21.8 \mu\text{m}$) son más propensas a aglomerarse debido a fuerzas de Van der Waals. Además, la hu-

medad puede reducir o mejorar la fluidez según cómo interactúe con las partículas [17].

2.3.5. Sinterizado

Esta etapa del proceso es crucial, ya que define las propiedades mecánicas de las piezas finales al consolidar su densidad. La pieza debe ser sometida a una temperatura entre el 70 y el 80 % de su punto de fusión [20], la cual debe mantenerse durante un período de entre 2 y 6 horas [7], en una atmósfera controlada de gas o en vacío para prevenir la oxidación. El aumento de temperatura debe llevarse a cabo de manera lenta, de modo que se garantice la salida de los gases producidos en el interior de la pieza, evitando la acumulación y la producción de esfuerzos internos que convellan a la iniciación de grietas internas. Los gases de protección más empleados en este proceso son el argón, el nitrógeno y el dióxido de carbono [12].

Durante la sinterización, las uniones iniciales entre las partículas generadas por el aglutinante son reemplazadas por enlaces metálicos tipo cuello, como se ilustra en la Figura 2.6. Este fenómeno provoca una reducción volumétrica debido a la disminución del área de contacto entre partículas en la formación de las uniones, lo que afecta directamente la densidad relativa de la pieza. Dicha densidad es proporcional a la reducción de los espacios intersticiales entre las partículas.

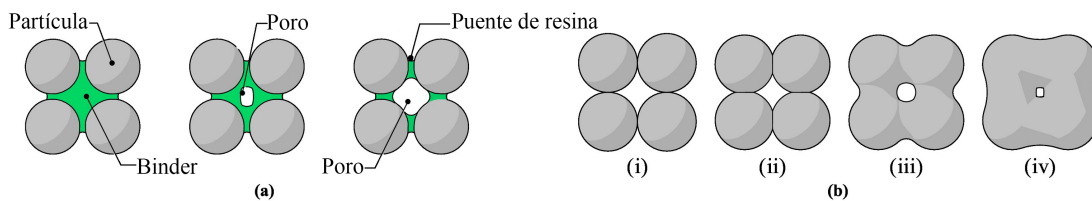


Figura 2.6. (a) Esquema del mecanismo de unión de las partículas de polvo, (b) Cuatro etapas de densificación de las partículas de sinterización (i) temperatura ambiente (ii) Crecimiento del cuello - unión inicial (iii) Redondeo de los poros - los cuellos se fusionan para formar poros tubulares (iv) Cierre de los poros - Crecimiento de grano con cierre de los poros.[10].

2.4. Silicato de Sodio como Binder

Los Silicatos de Sodio son soluciones acuosas preparadas a partir de SiO_2 y NaO_2 , cuya fórmula general es $Na_2SiO_3nH_2O$, donde n indica la relación molar del compuesto. De acuerdo con la variación en la proporción de disolución y la relación $SiO_2 : NaO_2$, se pueden obtener diferentes soluciones para una variedad de aplicaciones, tales como aglutinantes de diversos materiales, recubrimiento en metales, detergentes, tratamiento de agua, cementos, defloculantes, adhesivos, aislamiento de tuberías, fundición, limpieza de metales, aglomeración y pastillaje, flotación de minerales, entre otros [21].

En aplicaciones de impresión 3D, se han utilizado comúnmente soluciones acuosas de silicato de sodio en concentraciones desde el 20 % hasta el 40 % [22]-[24].

2.4.1. Relación $SiO_2 : NaO_2$

La relación molar $SiO_2 : NaO_2$ determina el tipo de aplicación en tanto las propiedades de cada solución varían, siendo unas más idóneas para ciertas aplicaciones que otras. Teóricamente, los óxidos de sodio y silicio pueden ser combinados en toda proporción. Sin embargo, en los productos actuales la relación de proporción varía entre 1.6 y 3.85 [22]. En la tabla 2.2 se observa una variación de algunas propiedades de acuerdo con la relación molar.

Relación en peso SiO_2/Na_2O	% Na_2O	% SiO_2	Densidad (20°C) Be g/cm ³		pH	Viscosidad en cp (20°C)
3,25	9,2	29,9	42,5	1,41	11,3	200 a 6000
3,22	8,9	28,7	41,0	1,38	11,3	
3,20	9,2	29,6	42,2	1,41	11,3	
2,88	11,1	31,9	47,0	1,47	11,5	650 a 3800
2,35	13,4	31,4	50,0	1,53	12,0	
2,40	13,8	33,2	52,0	1,55	12,0	1150 a 4000
2,00	14,7	29,5	50,5	1,53	12,7	
1,60	17,3	27,8	52,8	1,57	13,4	

Tabla 2.2. Variación de propiedades de acuerdo con la relación molar. Modificado de [22]

2.4.2. Propiedades fisicoquímicas relevantes

Viscosidad : La viscosidad es una propiedad importante en las soluciones de silicato de sodio, especialmente relevante en aplicaciones donde la solución es suministrada por inyección, donde influye directamente en la formación y control de las gotas desde el cabezal inyector. Esta viscosidad depende principalmente de la relación molar SiO_2/NaO_2 , la concentración y la temperatura de la solución. En general, las soluciones con mayor contenido de sílice (relación más alta) presentan un incremento más pronunciado en viscosidad a medida que aumenta la concentración, en comparación con aquellas más alcalinas [21]. Esto implica que, para garantizar una adecuada inyectabilidad, es fundamental controlar la viscosidad dentro de un rango compatible con la máquina, evitando tanto obstrucciones como una mala definición en la deposición del aglutinante.

pH : El pH de las soluciones de silicato de sodio está directamente relacionado con su concentración, ya que a medida que aumenta el contenido de sílice soluble, el pH tiende a disminuir ligeramente. Estudios potenciométricos indican que el pH elevado se mantiene estable hasta que la fracción alcalina es completamente neutralizada por ácidos añadidos. Además, la capacidad amortiguadora de estas soluciones —es decir, su resistencia a cambios en el pH frente a la adición de ácidos— mejora con una mayor relación SiO_2/NaO_2 . Incluso en soluciones diluidas, el silicato de sodio conserva un pH relativamente constante frente a adiciones moderadas de ácido [21].

Si bien su naturaleza fuertemente alcalina ($pH > 11$) no suele provocar efectos corrosivos directos sobre metales resistentes, como el acero inoxidable marten-

sítico, sí requiere precaución durante el post-proceso térmico. Específicamente durante el enfriamiento posterior a la sinterización, deben evitarse cambios térmicos bruscos o la exposición a atmósfera oxidante, ya que estos pueden inducir reacciones superficiales no deseadas debido a modificaciones en el pH local o a la degradación de residuos del silicato parcialmente sinterizados [25].

2.4.3. Mecanismo de endurecimiento

El endurecimiento de la mezcla SiO_2/NaO_2 en solución se basa en un proceso de deshidratación acelerada del silicato de sodio al exponerse a una corriente de dióxido de carbono. Esta interacción provoca un aumento repentino de la viscosidad y la formación de gel de sílice, cuya cantidad depende de la proporción $SiO_2 : NaO_2$ presente en la mezcla original. Durante este proceso, la solución acuosa de silicato reacciona con el CO_2 para generar ácido monosilícico y carbonato de sodio [23], según se observa la reacción química en la Figura 2.7.

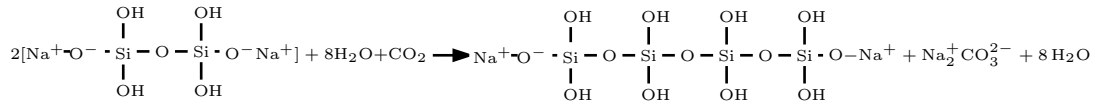


Figura 2.7. Reacción de una solución acuosa de Silicato de Sodio con CO_2 [26].

2.4.4. Compatibilidad con partículas metálicas

Como se mencionó previamente, la naturaleza fuertemente alcalina del silicato de sodio evita que su contacto con superficies metálicas genere corrosión. Al adherirse a las partículas metálicas, el silicato forma una capa pasiva que actúa como barrera protectora frente a ambientes potencialmente agresivos. Tal como señalan Tanane, Abboud, Aitenneite et al. [25], en su estudio con acero inoxidable 316L, el uso de silicato de sodio inhibió eficazmente la corrosión, evidenciando su funcionalidad como agente protector en elementos metálicos.

2.4.5. Debinding térmico

La efectiva eliminación del aglutinante se lleva a cabo mediante el proceso conocido como debinding térmico, en el cual se somete la pieza en verde, previamente curada, a una rampa de temperatura con un sostenimiento, con el fin de gasificar el material sólido del aglutinante, para proceder inmediatamente con el sinterizado. Este proceso, al igual que la sinterización, debe llevarse a cabo con aumento de temperatura lento y en una atmósfera controlada, con el fin de evitar cambios bruscos en el pH y la presencia de oxígeno [27], [28].

Capítulo 3

Metodología

El desarrollo del proyecto implicó llevar a cabo diversas actividades y tareas orientadas a alcanzar cada uno de los objetivos específicos previamente establecidos.

3.1. Revisión Bibliográfica Continua

La revisión bibliográfica fue un proceso esencial a lo largo de todas las etapas del trabajo, dada la necesidad de obtener información adicional durante el desarrollo de las actividades. Las principales fuentes de información son artículos científicos, trabajos de pregrado y diversas investigaciones previas relacionadas con los temas de interés.

3.2. Caracterización del material de trabajo

3.2.1. Ficha técnica

La información proporcionada por el fabricante sirvió como referencia inicial para la caracterización del material, permitiendo contrastar los datos experimentales con las especificaciones del proveedor. Esta base de referencia facilitó la identificación de equivalencias con materiales similares y la comparación de resultados con estudios previos.

3.2.2. Morfología

La morfología del material en polvo se analizó mediante microscopía óptica con el equipo OLYMPUS modelo GX41F. Para ello, se encapsuló una cantidad de polvo metálico en baquelita; posteriormente, se pulió y se observó. Luego, la muestra fue atacada con agua regia, lo que permitió visualizar la microestructura de cada partícula y estimar el tamaño de grano. Adicionalmente, se inspeccionó una muestra del polvo metálico en el estereoscopio marca NIKON modelo SMZ1000.

3.2.3. Distribución del tamaño de partícula

La distribución del tamaño de partículas (PSD) se realizó mediante granulometría con difracción láser, método que permite conocer la distribución estadística de los tamaños de partícula. Para esto, se hizo uso del equipo Malvern Instruments,

modelo Mastersizer 2000, disponible en el Laboratorio de Caracterización del Grupo GMC de la Escuela de Ingeniería de Materiales. Este equipo permite realizar el ensayo en seco para grandes cantidades de material industrial, o con el particulado en suspensión húmeda, en cantidades menores a 0,2g [29]. El equipo detecta y mide la radiación difractada por las partículas que se encuentran en la trayectoria del rayo láser.

3.2.4. Curva de sinterización

A partir de la información recopilada sobre el material y la información obtenida en la revisión bibliográfica, se propuso una curva de sinterización para evaluar su efectividad en términos de cohesión entre las partículas. Para ello, se realizaron pruebas iniciales con una muestra compactada del material, con el objetivo de determinar si la curva propuesta genera resultados favorables.

Las probetas comprimidas se obtuvieron en una máquina automática para ensayos a compresión marca Dirimpex modelo CT-1500, ubicada en el Laboratorio de Materiales Cerámicos y Compuestos, de la Escuela de Ingeniería de Materiales en la Universidad del Valle. Se compactaron 10 g del material en una matriz de compactación circular con diámetro de 1 pulgada, ejerciendo una fuerza axial de 400 kN de acuerdo con el trabajo realizado por Bello [15] con un acero de similar naturaleza.

Las pruebas de sinterizado se realizaron utilizando un horno tipo mufla de la marca Terrigeno modelo L2, que alcanza una temperatura máxima de 1300°C con un sostenimiento de hasta 10 horas [30]. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle.

Para estas pruebas se establecieron atmósferas protectoras con presencia de argón y nitrógeno, inicialmente con un flujo de 3 l/min de acuerdo con la información bibliográfica [12]. En la Figura 3.1 se observa el montaje utilizado.



Figura 3.1. Equipo utilizado para las pruebas de sinterización.

Inicialmente se propuso una curva de sinterización conservativa, con una tasa de calentamiento de 15°C/min hasta los 1060°C, con un tiempo de sostenimiento de 3 horas, seguido por un enfriamiento lento hasta la temperatura ambiente dentro del

horno, estimado en 2 a 5 horas [31], tal como se ilustra en la Figura 3.2. En esta prueba se utilizó argón como gas protector, con un flujo de 3 l/min.

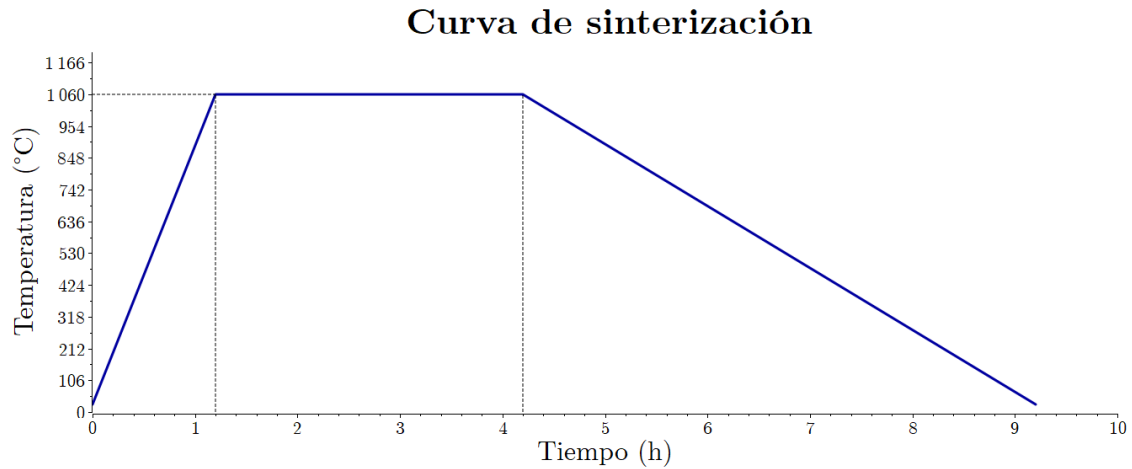


Figura 3.2. Curva de sinterización propuesta.

Dados los resultados obtenidos, se aumentó el tiempo de sostenimiento a 6 horas a 1100°C con las mismas condiciones de atmósfera protectora; luego se aumentó la temperatura a 1250°C por 6 horas con un flujo de nitrógeno de 6 l/min.

Posteriormente, se realizó metalografía a cada probeta con el fin de determinar el éxito de la prueba de sinterizado, verificando la existencia de uniones en forma de cuello entre las partículas del material.

3.3. Diseño de modelos

La geometría de las probetas se diseñó de acuerdo con las normas ASTM para ensayos mecánicos. Además, se generaron probetas cúbicas destinadas a la configuración y prueba del sistema de impresión.

Diseño del modelo CAD: Se utilizó Autodesk Inventor como software de diseño para crear el modelo 3D de las probetas y las piezas. Las probetas se diseñaron según la norma ASTM E8, mientras que la pieza principal se diseñó de manera simple, es decir, un impeller de cinco álabes curvos, sobre un cuerpo de cono invertido curvo y base circular. Esta etapa produjo archivos en formato STL.

3.4. Segmentación de los modelos 3D - Slicer Slicer propio

Ya que no existe un software compatible, ya sea comercial o de libre acceso, que permita realizar la segmentación de acuerdo con el sistema Binder Jetting implementado, se desarrolló un segmentador propio en Python con asistencia de Inteligencia Artificial, que genera las capas y las trayectorias de deposición a partir del modelo STL cargado.

El algoritmo permite:

- Intersectar el modelo 3D con planos horizontales sucesivos.
- Convertir la sección en trazos lineales de deposición.
- Aplicar raster bidireccional de ida y vuelta en dirección X.
- Añadir rutina para el esparcido de polvo.
- Centrarse automáticamente en la cama útil.

El script desarrollado constituye un aporte técnico exclusivo para el desarrollo de este trabajo, permitiendo controlar los parámetros:

- Altura de capa, definiendo la resolución en Z.
- Avance entre líneas sucesivas en dirección Y.
- Relación mm depositados / mm desplazados (Tasa de Extrusión).
- Velocidad del cabezal con inyección del binder.
- Velocidad de desplazamiento del cabezal sin inyección.

Los parámetros de segmentación que se deben ingresar se definen en función de las pruebas de inyección realizadas.

3.4.1. Diagrama de flujo

En la Figura 3.3 se puede apreciar el diagrama de flujo del Script segmentador desarrollado para la impresora utilizada.

3.5. Revisión y ajuste del equipo

- **Ajuste de componentes y Hardware:** Para garantizar el correcto funcionamiento de la máquina, fué fundamental realizar la revisión y mantenimiento de componentes como rodamientos, engranajes, motores y conexiones eléctricas. Un elemento clave es la cama de impresión, que debe estar perfectamente alineada y sin desajustes en sus elementos de fijación para asegurar la adecuada deposición de las capas de polvo.
- **Cabezal de inyección:** Este componente es responsable de aplicar el aglutinante sobre la cama de polvo, siendo su ajuste una etapa clave para el éxito del proceso. Parámetros como el diámetro de salida, presión, altura, caudal y frecuencia de deposición fueron controlados cuidadosamente. Además, se ajustó la variable de saturación del aglutinante para garantizar la uniformidad y calidad del resultado.

Se rediseñó el cabezal de impresión para adaptarse a la bandeja del cartucho original de la impresora. Para ello, se midieron las dimensiones del cartucho original y, con base en estas, se realizó el nuevo diseño. El cuerpo del cabezal se imprimió en resina translúcida, lo que permitió observar el flujo del aglutinante en su interior, además de asegurar cavidades sin fugas, un aspecto difícil de

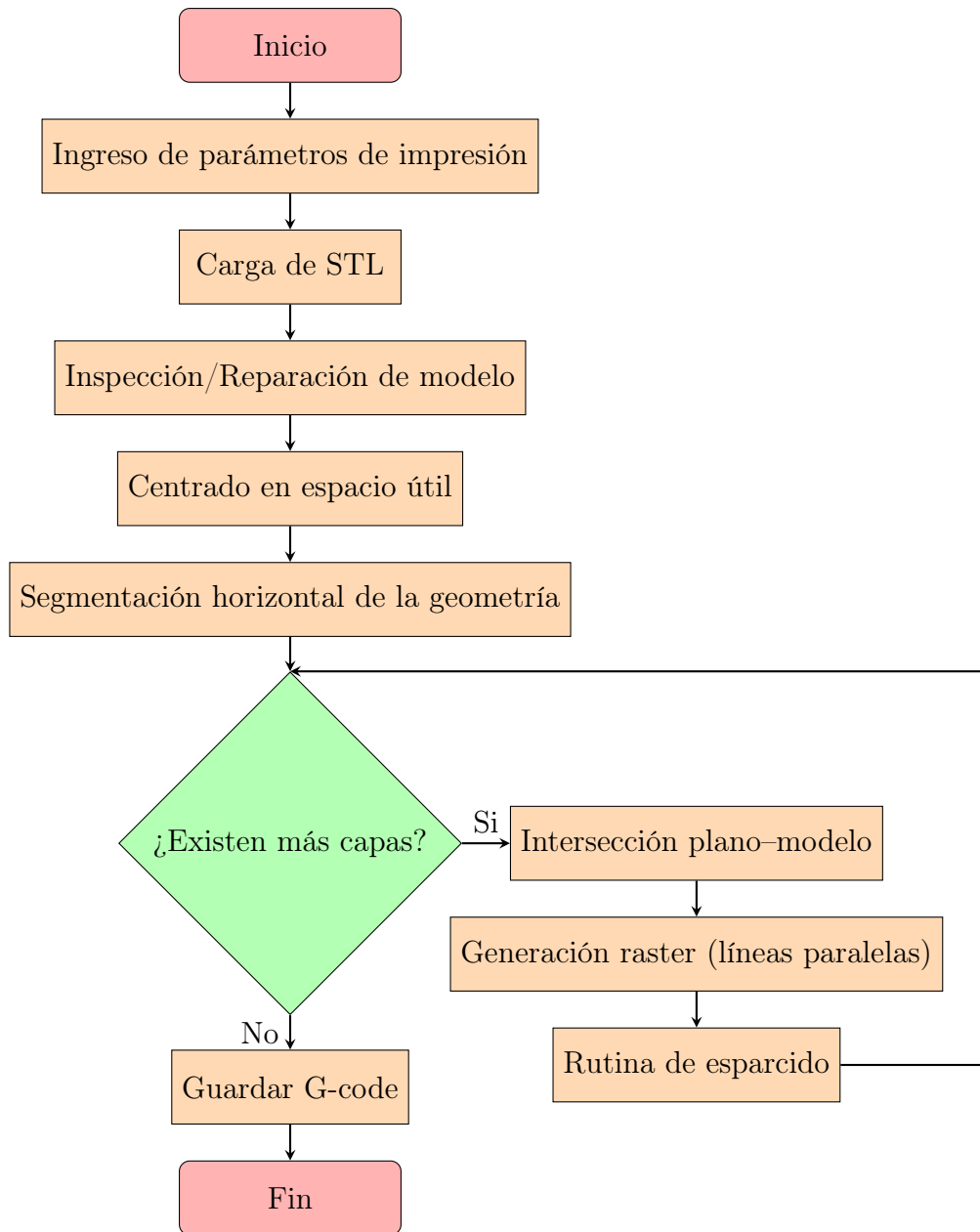


Figura 3.3. Diagrama de flujo Script segmentador.

controlar al imprimir una pieza mediante FDM. Para la salida del aglutinante se utilizó una boquilla de acero inoxidable de 0,2 mm, comúnmente empleada en impresoras FDM.

La deposición del aglutinante está a cargo de un relé electrónico modificado con una aguja oscilante, conectado a una de las fases del motor que anteriormente correspondía al extrusor de filamento. Este sistema desplaza el líquido dentro de la cavidad, permitiendo su salida por la boquilla en sincronía con los pulsos recibidos.

Una vez se instalaron todos los componentes del cabezal de inyección, se hicieron pruebas con agua estéril con colorante, con el fin de determinar las mejores

configuraciones de acuerdo a la salida de fluido obtenida.

- **Ajuste de parámetros de impresión:** Una vez que se tuvieron los modelos de impresión y el equipo se encontró funcionando adecuadamente, se debieron ajustar parámetros de impresión como la altura de capa, la velocidad del rodillo y la velocidad del cabezal, desde el software segmentador en base a los resultados obtenidos en las pruebas.

3.6. Preparación del Binder

La preparación de la solución acuosa de Silicato de Sodio se llevó a cabo siguiendo los lineamientos registrados en la revisión bibliográfica, donde se recomienda realizar la mezcla por agitación con calor, llevando el agua destilada a 40°C mientras se agrega el Silicato de Sodio líquido. Posteriormente, la mezcla se filtra y se deja en reposo para ser filtrada una vez más antes de depositarse en el reservorio del cabezal de la impresora, con el fin de eliminar impurezas y algunas partículas de precipitados que puedan llegar a formarse.

Una vez que la mezcla estuvo lista, se procedió a hacer una prueba con la impresora y el material de trabajo para determinar la operatividad del conjunto.

3.7. Obtención de piezas

Una vez se establecieron parámetros satisfactorios y los resultados de las pruebas fueron positivos, se procedió a realizar la impresión de los modelos, tanto de las probetas como del impeller, y su posterior sinterización.

El número de probetas fabricadas y sometidas a ensayos mecánicos estuvo limitado por la disponibilidad del material de trabajo y del gas argón, necesario para la sinterización en atmósfera controlada. Debido al alto costo de estos insumos y a la infraestructura disponible, las probetas impresas se sometieron a una misma corrida de sinterización. En consecuencia, los ensayos mecánicos realizados en este trabajo tienen un carácter exploratorio y comparativo, orientado a evaluar la viabilidad del proceso MBJ y a identificar puntos críticos y tendencias generales, más que a establecer propiedades mecánicas representativas desde un punto de vista estadístico.

3.8. Caracterización de las propiedades mecánicas

La determinación de las propiedades mecánicas se realizó siguiendo las especificaciones de las normas ASTM aplicables.

- **Prueba de tracción:** Este ensayo se llevó a cabo utilizando el equipo de ensayos mecánicos Tinius Olsen modelo H50KS, ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle. Según la norma ASTM E8, la prueba debe realizarse dentro de un rango de temperaturas de 10 a 38 °C.

- **Prueba de impacto:** Se realizó de acuerdo con la norma ASTM A23, empleando el equipo Tinius Olsen It 504 Plastic Impact, ubicado en el Laboratorio de Materiales Poliméricos de la Universidad del Valle.
- **Medición de dureza:** La dureza Rockwell fue determinada conforme a la norma ASTM E18. El equipo utilizado para este ensayo fue un durómetro Rockwell marca Wilson, ubicado en el laboratorio de metalografía I, en la Escuela de Ingeniería de Materiales. La carga utilizada fue de 60 kg.

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1. Caracterización del material

4.1.1. Ficha técnica

El material de trabajo es un polvo de acero inoxidable martensítico de referencia METCO 42C, de la marca Sulzer Metco. Es un producto discontinuado, actualmente producido por Oerlikon bajo la misma referencia. En el sitio web es posible hallar la ficha técnica del producto, consignando los datos relevantes en la Tabla 4.1.

Clasificación	Aleación ferrosa
Química nominal	Acero martensítico – Fe 17Cr 2Ni 0.18C
Equivalente	AISI 431
Método de obtención	Atomizado por agua
Distrib. nominal tamaño de partículas	$-106 +45 \mu\text{m}$
Morfología	Irregular
Propósito	Recubrimiento contra corrosión, desgaste y restauración
Temperatura de servicio	Igual o menor a 540°C
Tecnología de proceso	Spray de plasma atmosférico, HVOF

Tabla 4.1. Ficha técnica del material de trabajo.

Teniendo en cuenta la equivalencia reportada por el fabricante del material a un acero AISI 431, que comparte una composición química similar [32], se analiza el diagrama binario de fases Hierro - Cromo (Figura 4.1), ya que este último es el elemento de aleación que predomina.

De acuerdo al diagrama, para un contenido de Cromo del 17 %, la temperatura de fusión es de 1490°C aproximadamente.

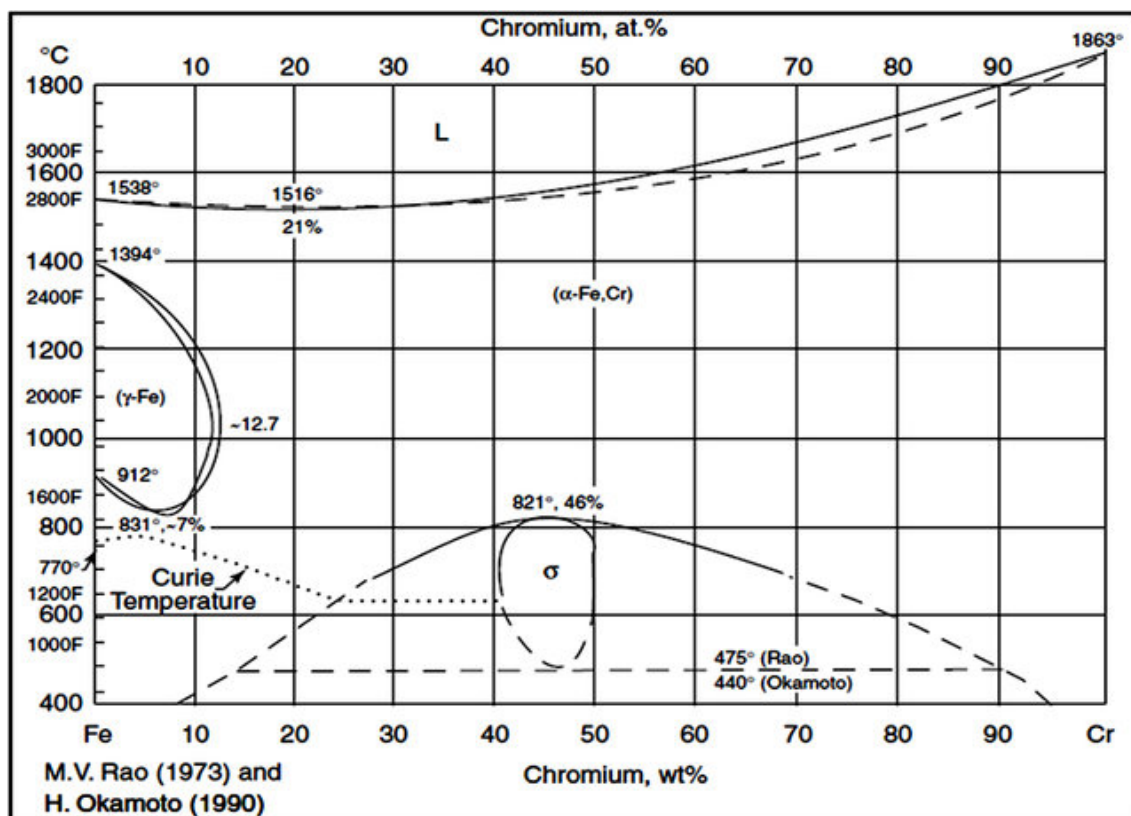
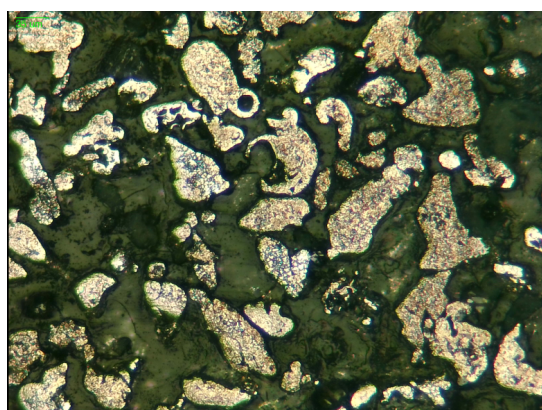


Figura 4.1. Diagrama binario de fases Hierro - Cromo. [33]

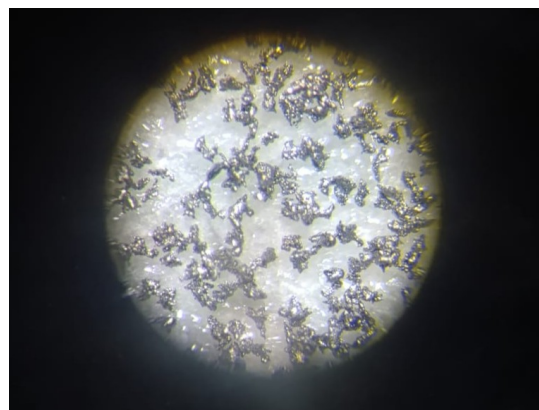
4.1.2. Morfología

Microscopía óptica y estereoscópica

La muestra encapsulada se preparó para su observación, observándose contornos irregulares y bordes angulosos en las formas de las partículas, corroborando la información ofrecida por el fabricante. Figura 4.2.



(a) Fotografía de una muestra a 100x.



(b) Vista al estereoscopio de la muestra.

Figura 4.2. Morfología del material de trabajo

En la metalurgia de polvos, si bien la morfología esférica es considerada ideal debido a su alta densidad aparente y excelente fluidez, las partículas de morfología irregular presentan una mayor capacidad y velocidad de sinterizado. En general,

aquellas con una mayor área superficial específica tienden a exhibir mejores propiedades de sinterización [18], [34]. Con base en lo anterior, una vez determinada la temperatura de sinterización, el tiempo de sostenimiento no supone una limitación significativa para el proceso de sinterización. Aun así, dada la baja densidad aparente de las partículas irregulares, se espera una reducción en las propiedades mecánicas de las piezas resultantes [13].

La muestra del material fue tratada con agua regia para revelar su estructura granular y permitir la estimación del tamaño de grano, tal como se muestra en la Figura 4.3. El análisis arrojó un tamaño de grano promedio de $3.857 \pm 0.171 \mu\text{m}$.

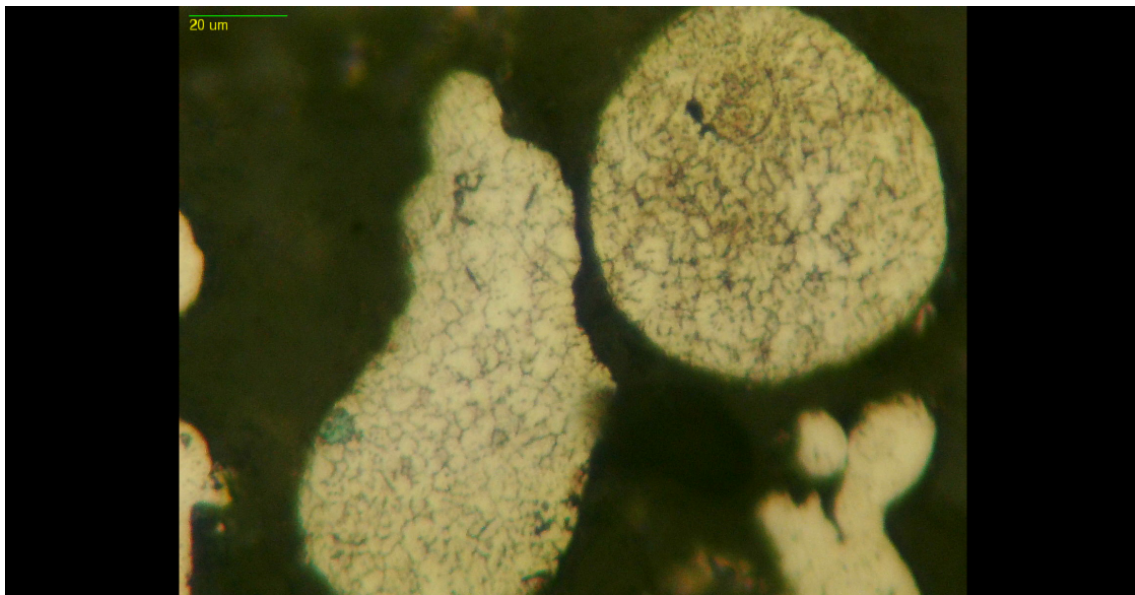


Figura 4.3. Metalografía del material en polvo.

4.1.3. Distribución de tamaño de partícula

Se obtuvo la curva granulométrica mediante difracción láser para una muestra de aproximadamente 10 g de material. Figura 4.4.

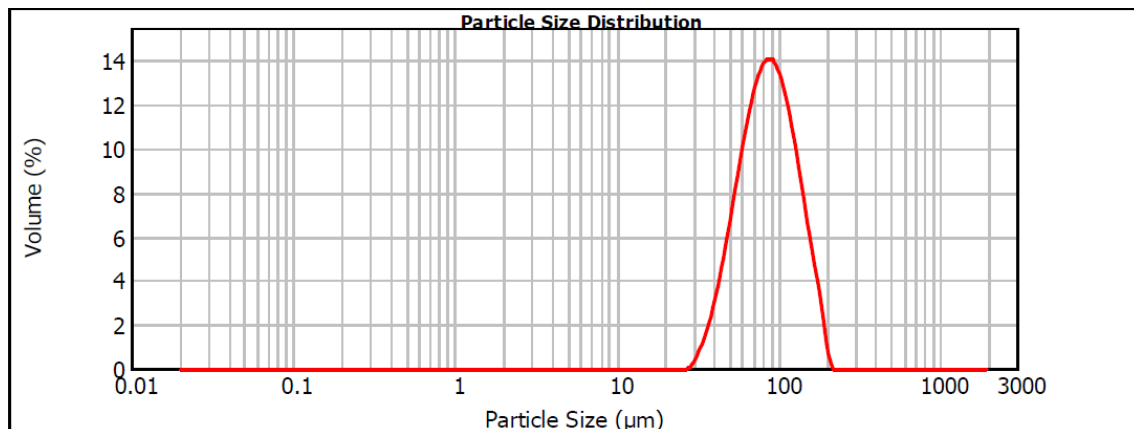


Figura 4.4. Curva granulométrica obtenida.

La Tabla 4.2 muestra la distribución porcentual del tamaño de partícula de la muestra analizada. El percentil D10 indica el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 10 % de la muestra, mientras que los percentiles D50 y D90 corresponden a los tamaños para el 50 % y el 90 % de la muestra, respectivamente. El tamaño promedio de partícula obtenido en el ensayo fue de 92.483 μm .

Muestra	d(0.1) μm	d(0.5) μm	d(0.9) μm	D(4.3) μm
METCO 42C	50.235	86.43	144.458	92.483

Tabla 4.2. Distribución porcentual de tamaño de partícula.

Basándose en la información proporcionada por el gráfico, se prevé que las piezas impresas con el polvo seleccionado no alcanzarán una densidad de empaquetamiento óptima, ya que predomina un tamaño de partícula grande ($\approx 100\mu$), con la distribución muy concentrada sobre el tamaño medio, lo que indica uniformidad y homogeneidad en la granulometría, con menor presencia de partículas de menor tamaño, lo que impide conseguir la densidad de empaquetamiento óptima, según estudios previos [35]-[37].

Esta condición favorecerá la formación de poros en la estructura, afectando la continuidad de la matriz una vez sinterizada, y en consecuencia, resultarán propiedades mecánicas deficientes cuando las piezas sean sometidas a esfuerzos durante su funcionamiento debido a su baja densidad de empaquetamiento [13].

4.1.4. Temperatura de Sinterización

Teniendo en cuenta que la temperatura de sinterización está entre el 70-80 % de la temperatura de fusión, para este caso se obtiene una temperatura de sinterización teórica de 1045°C. Un valor que resulta bajo comparado con los trabajos previos consultados, en los que se manejan temperaturas por encima de los 1100°C hasta los 1350° inclusive [36].

Las muestras previamente compactadas conservaron su forma después de ser retiradas de la matriz, listas para la prueba de sinterización en el horno con atmósfera controlada. Figura 4.5.



Figura 4.5. Polvo de acero inoxidable martensítico compactado.

La primera prueba de sinterización a 1060°C no arrojó resultados favorables. Se realizó la metalografía con la cual se determinó que no había presencia de uniones de cuello entre las partículas, tal como se observa en la Figura 4.6, en donde son claramente identificables las fronteras de cada partícula; más aún, se aprecia la formación de precipitados en estos bordes.

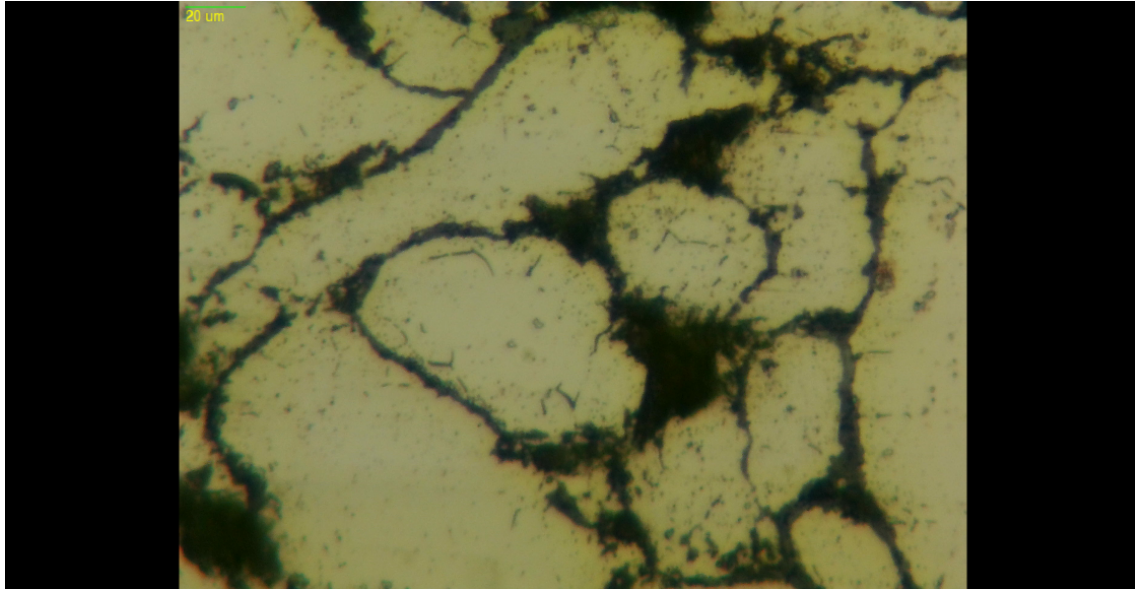


Figura 4.6. Microscopía a 400x de la muestra sinterizada de la primer prueba.

La segunda prueba de sinterización con temperatura de sostenimiento de 1100°C arrojó resultados similares.

La tercera prueba a 1250°C con nitrógeno, si bien permitió la formación de las uniones tipo cuello entre las partículas (Figura 4.7), demostró la insuficiencia de la atmósfera protectora, al existir formación de óxido en una distancia de hasta 2 mm desde el borde de la probeta. Esta última prueba determinó la temperatura efectiva

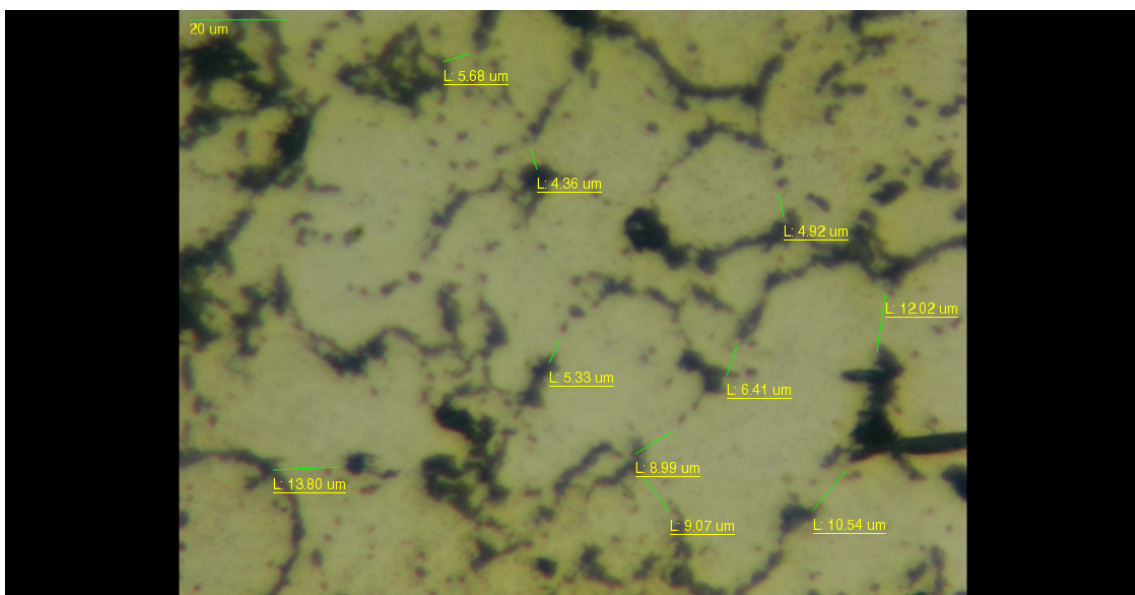


Figura 4.7. Microscopía de la probeta en la tercera sinterización. Se observa continuidad y la formación de uniones tipo cuello entre las partículas metálicas.

de 1250°C para la sinterización, siendo necesario aumentar el flujo de gas protector para prevenir la formación de óxido superficial.

Para la sinterización final del impeller y las probetas para los ensayos mecánicos, se fabricó una caja de acero para contener un lecho granular en el que se embebieron las piezas, con el fin de soportar la geometría y mantener la forma durante la pérdida de aglutinante, evitando el colapso. [38]-[40].

En la elaboración de la curva de sinterización definitiva, se tuvieron en cuenta todos los aspectos relevantes estudiados, tales como la eliminación de agua, la deshidratación del Silicato y la rampa de sinterizado con el sostenimiento correspondiente, en donde la temperatura efectiva de sinterización se fijó en 1300°C, teniendo en cuenta las dimensiones de las piezas, la cantidad y el medio en el que se hallaban. En la Tabla 4.3 y la Figura 4.8 se relacionan la curva de sinterización final y los segmentos que la componen.

Etapas	Desde - Hasta (°C)	Velocidad (°C/min)	Sostenimiento (h)
Secado inicial	25–120	2	1.5
Rampa lenta para eliminar agua ligada	120–200	1	2
Rampa lenta para Debinding; descomposi- ción/deshidratación del Na ₂ SiO ₃	200–400	0.5	4
Rampa inicial a sinterizado	400–900	2	1
Desgaseado final y precalentamiento	900–1150	5	4
Sinterizado	1150–1300	4	3
Enfriamiento lento hasta temperatura ambiente	1300–25	1	10

Tabla 4.3. Temperaturas establecidas para la curva de sinterización.

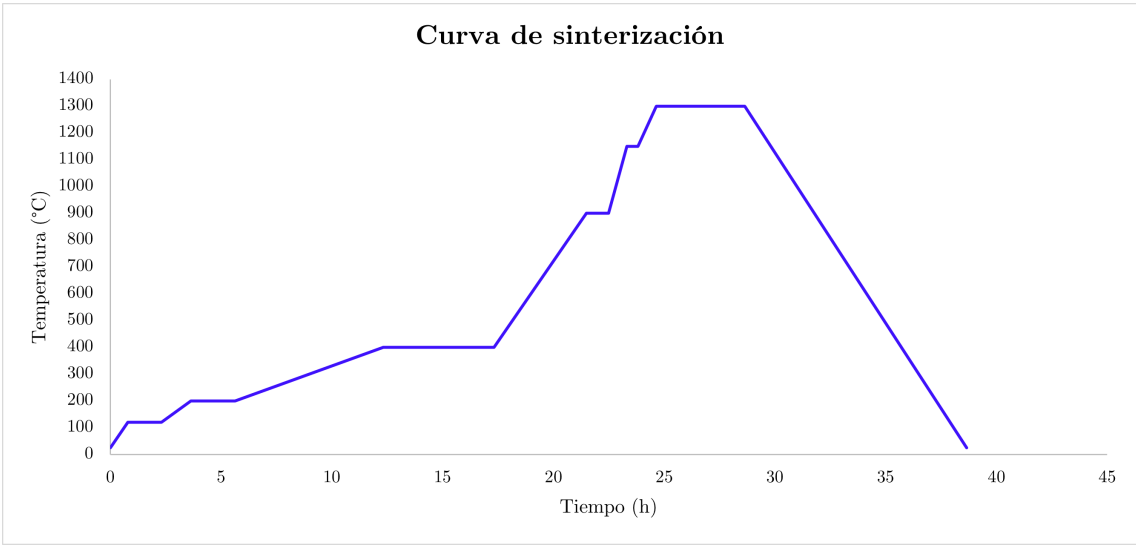


Figura 4.8. Curva de sinterización.

4.2. Diseño de modelos

El diseño de los modelos, tanto las probetas como las piezas de prueba y el impeller, se llevó a cabo utilizando el software Autodesk Inventor. En la Figura 4.9 se presenta una vista general de los modelos generados, los cuales fueron construidos considerando la orientación de la cama de fabricación, con el fin de optimizar el proceso de manufactura.

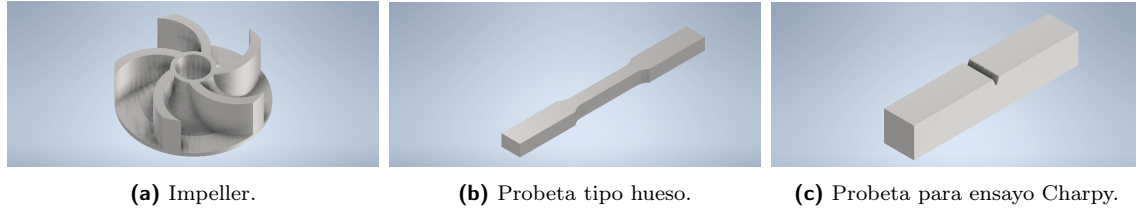


Figura 4.9. Modelos generados en AutoDesk Inventor

Para el impeller se tomó como base el impulsor de la bomba de un automovil de gama media, tipo compacto, que representa el parque nacional automotor, de 8 cm de diámetro por 2,5 cm de alto. Esta pieza se realiza mediante un proceso de conformado, en el que se toma una chapa metálica plana, previamente recortada, y se le aplica presión para dar forma a los alabes. Esta configuración resulta en un impeller semiabierto, con alabes rectos que no están en contacto con el cubo central.

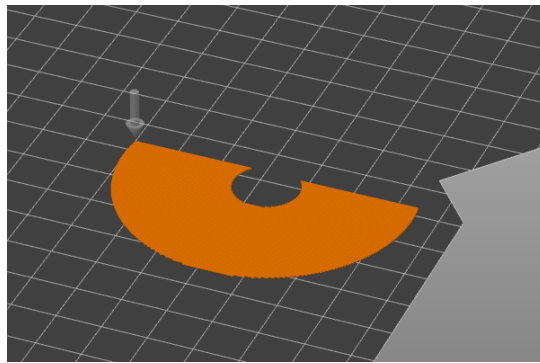
Una geometría mas compleja y especializada en los alabes permite aumentar la eficiencia de las bombas de agua, pero la obtención de estos resulta demasiado compleja y costosa para su producción en masa. Para el diseño del impeller a imprimir, se construyeron alabes curvos completos, una geometría mas acorde con los diseños de alto rendimiento. La curvatura de estos, la inclinación y espesor fueron tomados sin discriminación, ya que el cálculo de estas variables para la optimización requiere un estudio especializado, fuera del alcance de este proyecto.

Las probetas de tensión e impacto se diseñaron de acuerdo con las especificaciones ASTM E8 Y ASTM E23 respectivamente, teniendo en cuenta el equipamiento disponible en la Universidad del Valle para la realización de estas pruebas.

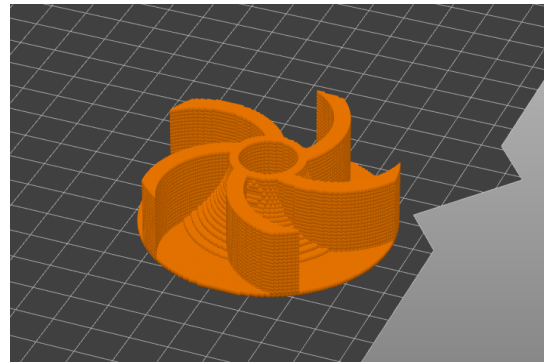
4.3. Resultados del proceso de segmentación

Se logró generar el archivo G-Code de deposición con éxito para el impeller y las probetas de tensión e impacto. Se obtuvieron capas de 1 mm de altura y se evidenció la fidelidad geométrica del patrón raster. En la Figura 4.10 se observa la segmentación realizada en el impeller, haciendo uso de la herramienta PrusaSlicer G-code Viewer. En la Figura 4.10a se puede visualizar el patrón de construcción línea a línea, desde el frente hacia el fondo, con incremento en la dirección Y.

En la Figura 4.11 se observa el G-code cargado en el software Repetier Host, desde donde se envían los comandos a la impresora. Se indica el numero de capas, el total de líneas y un tiempo estimado de impresión, calculado de acuerdo con la cantidad de movimientos y las velocidades establecidas.



(a) Simulación de la impresión línea a línea.



(b) Vista del modelo segmentado.

Figura 4.10. Visualización del G-Code generado en el segmentador.

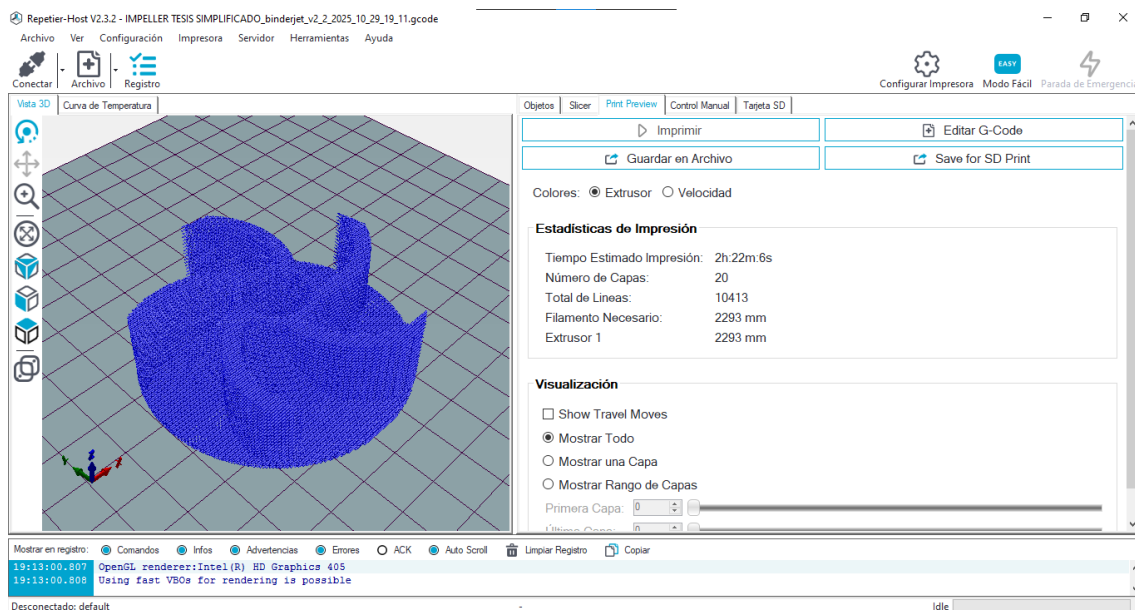


Figura 4.11. G-code cargado en Repetier Host.

4.4. Revisión y ajuste del equipo

4.4.1. Limpieza y mantenimiento

Inicialmente, se realizó un desmonte y limpieza completa de toda la máquina, ya que se encontraba con residuos de polvo y Binder de trabajos anteriores. Después de la limpieza, se llevó a cabo una reorganización y reconexión de algunos cables y conectores que no se encontraban en las mejores condiciones. Posteriormente a esto, se puso a prueba el equipo por medio del control manual que provee el software Repetier Host, el cual permite controlar los movimientos de los componentes desde la aplicación de escritorio, verificando así la funcionalidad de los motores paso a paso, los ejes y las guías en los tres ejes cartesianos.

Con esta revisión se determinó que el equipo estaba apto para su uso en el desarrollo de este proyecto, al encontrarse en un mejor estado que el inicial y habiendo comprobado la funcionalidad de los principales componentes.

4.4.2. Cabezal de impresión

Con el propósito de mejorar la resolución de impresión del equipo, se modificó el cabezal de inyección para garantizar una deposición uniforme del Binder. Inicialmente, la máquina contaba con un depósito recargable y una aguja oscilante que se encargaba de expulsar el fluido al interceptar la señal dirigida al extrusor de filamento en una plataforma FDM. El contenedor fue construido utilizando impresión 3D FDM, con filamento de ABS, un método que no es el idóneo para el manejo y almacenamiento de fluidos, ya que las pequeñas brechas entre los filamentos y las capas de impresión conllevan fugas.

Las fugas se pueden evitar con una pieza sólida, de modo que se optó por rediseñar el contenedor de Binder, con flujo continuo y para ser manufacturado por impresión DLP utilizando una resina translúcida estándar (Figura 4.12a). Posterior a la obtención de la pieza, se debió realizar el maquinado para la ubicación de la boquilla y el accesorio para la entrada del fluido, además de la instalación del relé con la aguja. El montaje completo se observa en la Figura 4.12b.

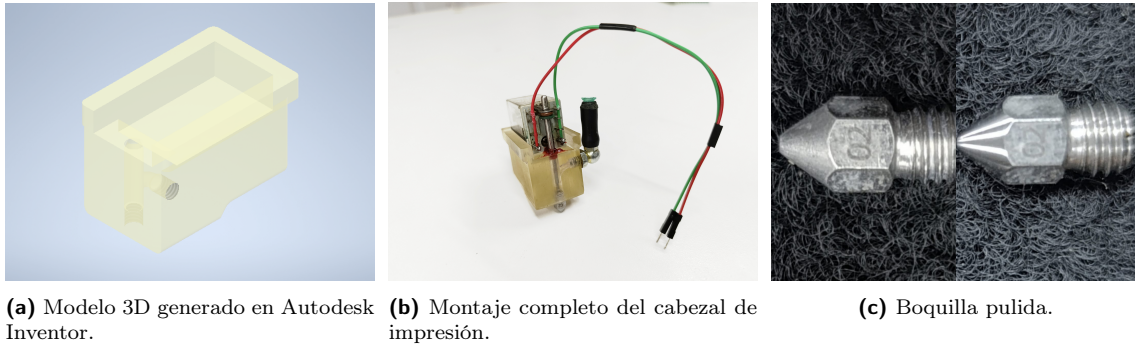


Figura 4.12. Mejora en el cabezal de impresión.

Durante las primeras pruebas, se evidenció la acumulación del Binder en la boquilla, lo cual generaba intermitencia y goteo en la deposición. Esta condición se corrigió al pulir la superficie para evitar el anclaje físico [41] (Figura 4.12c) y realizar un recubrimiento con lubricante seco PTFE comercial, con el fin de evitar la adherencia del Binder por su hidrofobicidad [42]. Posterior a cada uso, se debe realizar la limpieza de todo el cabezal, con el fin de evitar sedimentación por cristalización del Binder, formación de residuos sólidos y obstrucción en la boquilla. Del mismo modo, antes de cada uso se debe aplicar el lubricante, ya que para una sola pieza pequeña no fue posible lograr un recubrimiento permanente con los recursos disponibles en los Laboratorios de la universidad.

4.4.3. Ajuste para la impresión

Con el fin de garantizar un control preciso sobre la cantidad de material depositado por el desplazamiento y mantener una extrusión constante de Binder, se realizaron pruebas de inyección sobre hojas de papel con agua coloreada (Figura 4.13), de donde se obtuvieron los siguientes valores de parámetros:

***Tasa de extrusión:** 0,05 mm extruidos por cada mm recorrido.

Velocidad de cabezal en inyección: 800 mm/min.

Velocidad de desplazamiento: 4500 mm/min.

*Cabe recalcar que si bien en este proceso no se lleva a cabo extrusión de filamento, la programación de la placa madre de la impresora está establecida para impresión FDM, con lo cual la placa envía los impulsos necesarios de onda cuadrada para un motor extrusor, señal que es captada por el relé y finalmente determina la cantidad de Binder que es inyectada. Adicional a las pruebas de inyección, se realizaron

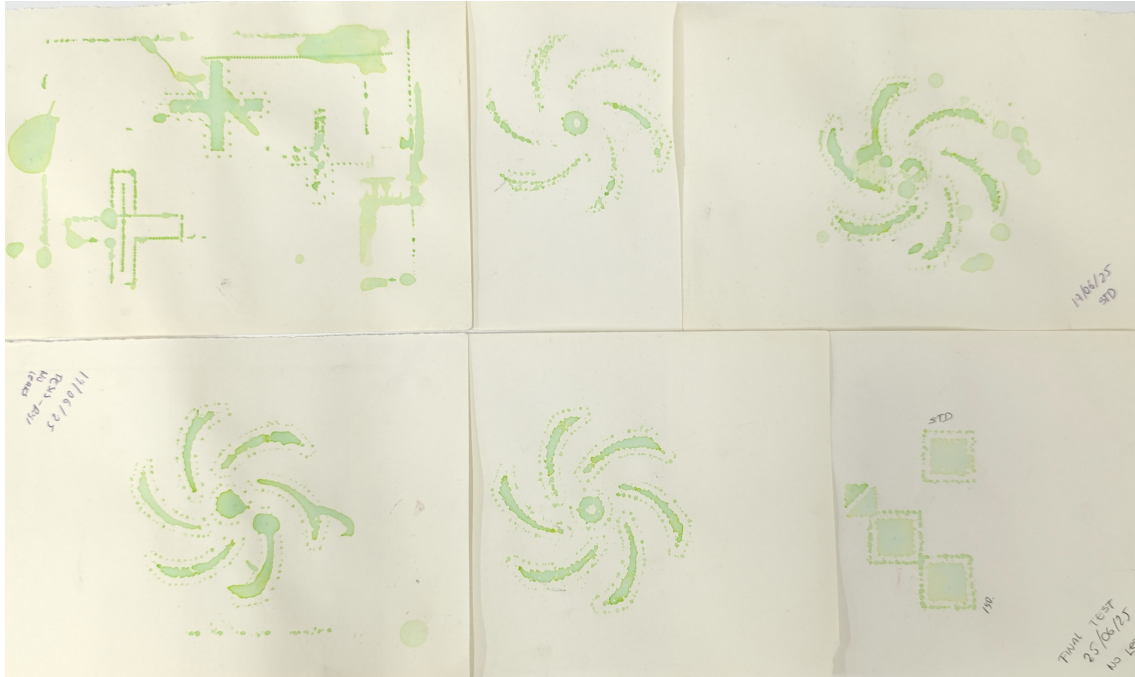
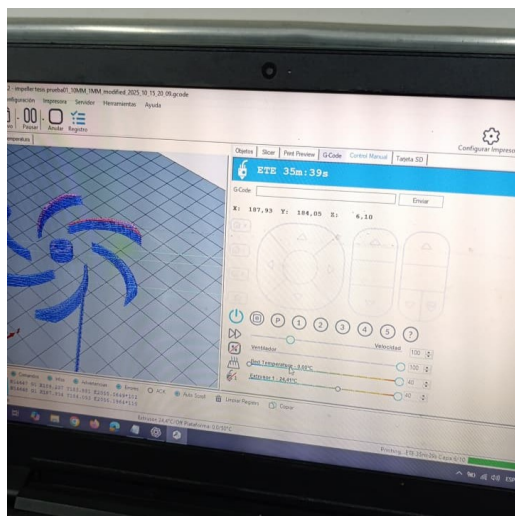


Figura 4.13. Desde la parte superior derecha hasta la esquina inferior izquierda se observa el avance en los ajustes del cabezal hasta los mejores resultados.

pruebas para el esparcido de polvo, en donde se evidenció que una velocidad lenta de 600 mm/min era requerida para garantizar un correcto esparcido del polvo, sin distorsionar la capa previa.



(a) Vista del modelo en Repetier Host.



(b) Geometría generada en capa de polvo metálico.

Figura 4.14. Pruebas de deposición de Binder con el material de trabajo.

En cuanto a la altura de capa y el avance entre líneas en dirección Y , se fijaron valores de 1 mm y 0,5 mm respectivamente, dado el tamaño de gota depositada. En la Figura 4.14 se observa una deposición de material correcta, ajustada al modelo de prueba diseñado.

4.5. Obtención de piezas

4.5.1. Resultados de impresión 3D mediante Metal Binder Jetting

Pruebas preliminares

La primera pieza de prueba que se utilizó para evaluar el poder aglutinante del Silicato de Sodio fue un cilindro de 17 mm de diámetro por 7 mm de alto. La muestra fue dejada para secar al aire ambiente, sosteniendo su forma aún después de 24 horas, como se observa en la Figura 4.15.



Figura 4.15. Pieza en verde construida para evaluar la adherencia del Silicato en las partículas metálicas.

Posterior a esta prueba, se realizó una impresión con un modelo de prueba con una geometría similar a la pieza objetivo, el cual se dejó secar durante 6 días expuesto al ambiente. El resultado se muestra en la Figura 4.16. La pieza obtenida conservó su integridad durante la extracción y la limpieza de polvo no sinterizado.

Una vista al estereoscopio permite visualizar la unión de las partículas, verificando la adhesión del Binder a la superficie de estas. Figura 4.17.

Impresión en verde de impeller mediante Metal Binder Jetting

Durante la fabricación del impeller se observó inicialmente una buena fidelidad geométrica en la deposición de gotas del Binder (Figura 4.18a) y la formación de capas de construcción, visibles en la pieza en verde (Figura 4.18c). Sin embargo, tras la extracción y limpieza con aire a presión, se evidenció que los álabes del impeller presentaban un espesor mayor al del diseño original, y que el agujero central se encontraba parcialmente cerrado, tal como se observa en la Figura 4.18b. La distorsión geométrica en el espesor de los álabes es de $4 \pm 0,01$ mm, pasando de 5 mm originales a 9 mm. En las áreas con mayor distorsión, llegó hasta 10 mm, inclusive.



(a) Modelo impreso y seco en la impresora.



(b) Modelo extraído de la impresora.

Figura 4.16. Impresión en verde, pieza de prueba.

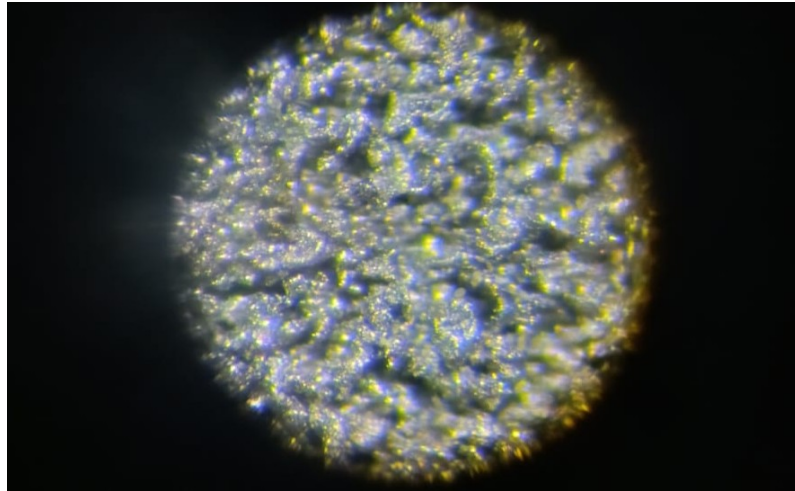
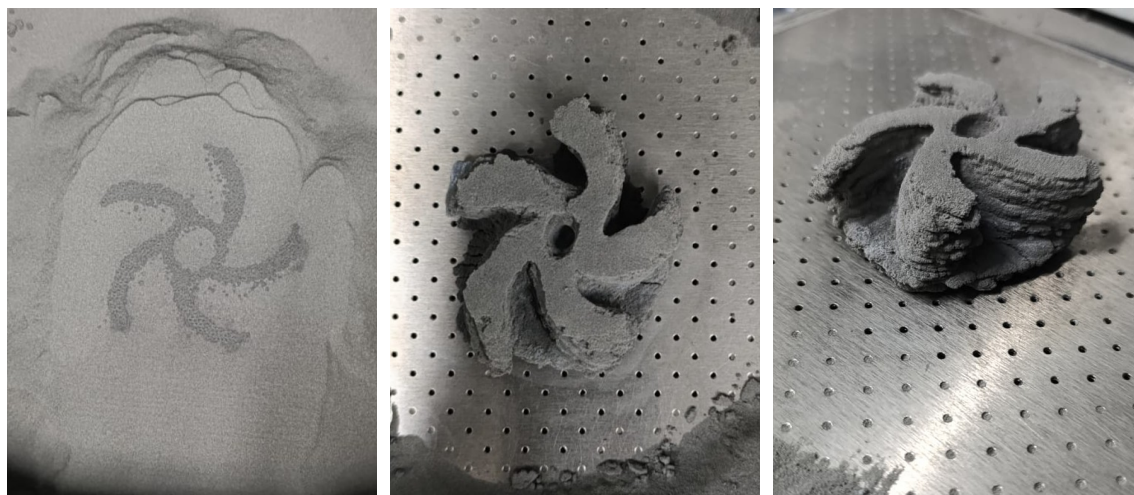


Figura 4.17. Vista al estereoscopio. superficie de pieza impresa, en verde.

Estos fenómenos se atribuyen a la infiltración lateral del Binder en las partículas adyacentes. Esta condición puede atribuirse a la morfología irregular del polvo, la baja densidad de empaquetamiento de acuerdo con su granulometría, y la limitada capacidad de control volumétrico del sistema de deposición implementado, que ocasionó una profunda difusión capilar [13], [14], [17], [35], [37].

Durante la construcción del modelo, se observaron irregularidades durante la dispersión de polvo en algunas capas, lo que indica una baja fluidez del polvo, al producirse anclaje de las partículas metálicas entre si al ser comprimidas y barridas por el rodillo. De acuerdo con Miao, Du, Pei et al. [43] y Meier, Weissbach, Weinberg et al. [44] esta condición se debe a la morfología irregular y de bordes angulosos de las partículas, que generan inestabilidad en la capa de polvo y degradan la calidad del lecho. La falta de uniformidad completa durante la construcción de las capas genera grietas internas al empujar las capas previas, lo que impide que haya continuidad en la estructura aglutinada, debilitando la pieza final.



(a) Capa recién terminada. El modelo es fiel al diseño original. (b) Impeller tras secado, en verde. (c) Se aprecian las capas de construcción en sentido de apilamiento.

Figura 4.18. Impresión en verde de la pieza Impeller.

4.5.2. Resultados de la sinterización

Preparación previa

Las piezas impresas en verde; probetas, impeller y pieza de prueba, fueron ubicadas dentro de la caja metálica contenedora, siendo gradualmente cubiertas con arena sílice previamente tamizada ($106\ \mu m$), tal como se aprecia en la Figura 4.19. Una vez que estuvieron totalmente cubiertas, se procedió a nivelar y compactar la arena, con el fin de garantizar el recubrimiento completo de todas las superficies.



(a) Contenedor metálico fabricado. (b) Ubicación de piezas dentro de contenedor. (c) Piezas cubiertas y levemente compactadas.

Figura 4.19. Preparación de piezas para la sinterización.

Una vez finalizado el ciclo térmico, se retiró la caja contenedora de la mufla, en la cual se presentó una condición anómala; pérdida de los apoyos refractarios ubicados bajo la caja, lo cual produjo una deformación en la base de esta. Posteriormente, se realizó la extracción y limpieza inicial de las piezas, tal como se aprecia en la Figura 4.20. No se presentó distorsión geométrica macroscópica de las piezas, entendida

como cambios apreciables en la forma externa, alabeo o colapso de la geometría respecto a la pieza en verde, demostrando eficiencia al aplicar el método de sostén brindado por la arena.

No obstante, se evidenció la presencia de grietas internas profundas únicamente en el impeller, una de las cuales comprometió la integridad estructural del impeller.



Figura 4.20. Piezas extraídas.

Dos de las tres probetas de tensión resultaron rotas tras la extracción, con una ligera deformación en el área de fractura, atribuible a la deformación de la caja contenedora. La fractura se localizó en la transición entre la zona de agarre y la sección calibrada, de modo que la región útil de ensayo permaneció íntegra en ambos casos. Además, se evidenció la presencia de grietas profundas en el impeller. La textura de todas las piezas fue de carácter granuloso, por lo cual se requirió una limpieza adicional para remover granos de arena adheridos a la superficie de las piezas.

Durante la limpieza del impeller se produjo una rotura espontánea de uno de los alabes, siguiendo la línea de una de las grietas presentes. Con esta falla fué posible observar un núcleo de color verde en la parte baja central de la pieza, con textura granulosa (Figura 4.21), evidencia de falla localizada en la sinterización.



(a) Fragmento desprendido del impeller.



(b) Vista del área transversal de la falla.

Figura 4.21. Ruptura de álabe en la pieza impeller.

Estos hallazgos revelan una densificación parcial; los bordes con mejor acceso térmico alcanzaron difusión y sinterización, mientras que la zona interna, con mayor área transversal permaneció en estado verde o parcialmente sinterizada, con las partículas aglomeradas. Esta condición indica una falla en la transferencia de calor, ocasionada por la presencia de poros y el posible encapsulamiento de gases en el interior.

Cabe resaltar que la deformación observada en la caja contenedora, además de inducir deformación y fractura en las probetas y posiblemente en el impeller, también pudo ocasionar deficiencias en la transferencia de calor desde las resistencias de la misma mufla, al ocasionar falla de las resistencias por contacto prolongado con la base de la caja contenedora.

En la Figura 4.22 se aprecia una vista en el estereoscopio de la zona de fractura, donde se confirma la sinterización estratificada en las áreas externas y el aspecto de la zona central no sinterizada. Adicional a la condición de sinterización en capas, se evidencian grietas internas y alta porosidad. A causa de esta última condición no fué posible realizar una metalografía.

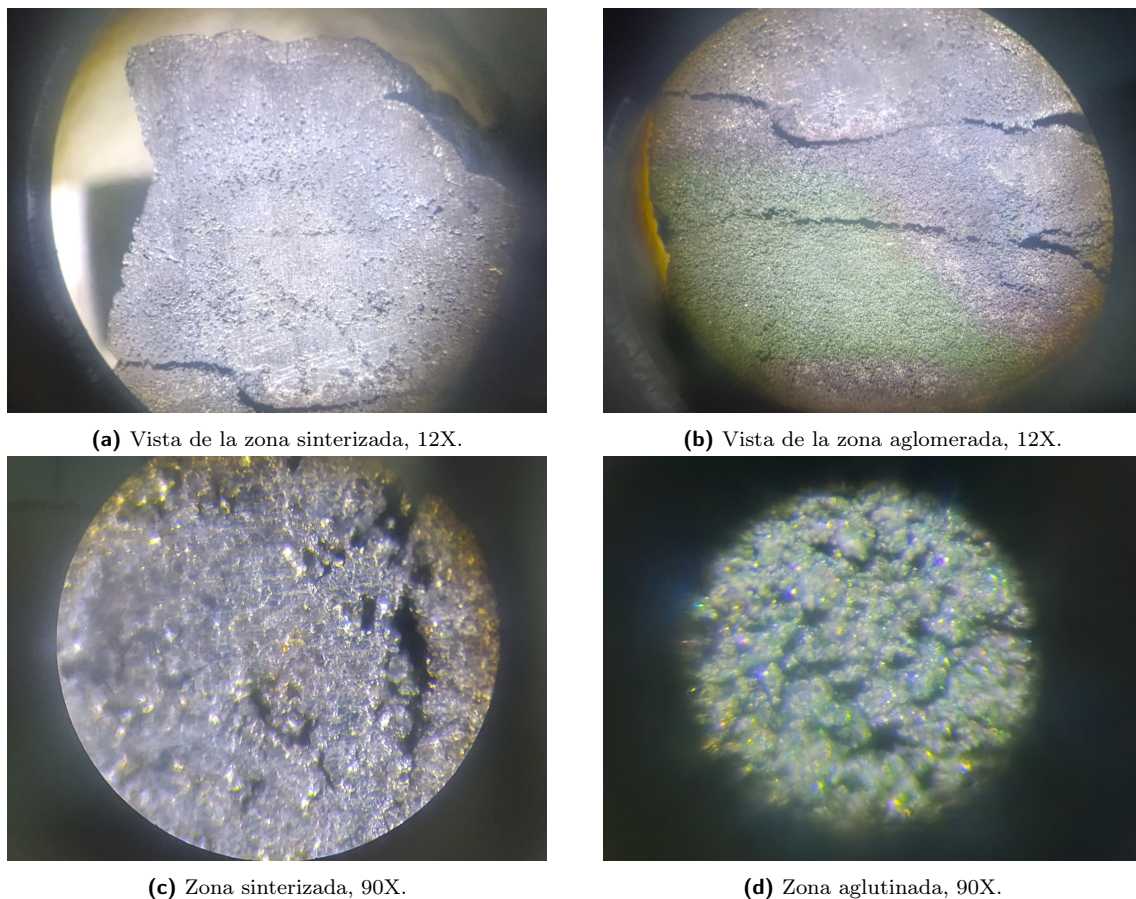


Figura 4.22. Vista al estereoscopio del segmento fracturado.

La pieza de prueba fue seccionada para su análisis, evidenciando una sinterización completa en una matriz discontinua debido a la presencia de poros, tal como se aprecia en la Figura 4.23.

Una geometría simple permitió obtener una pieza en verde más compacta y

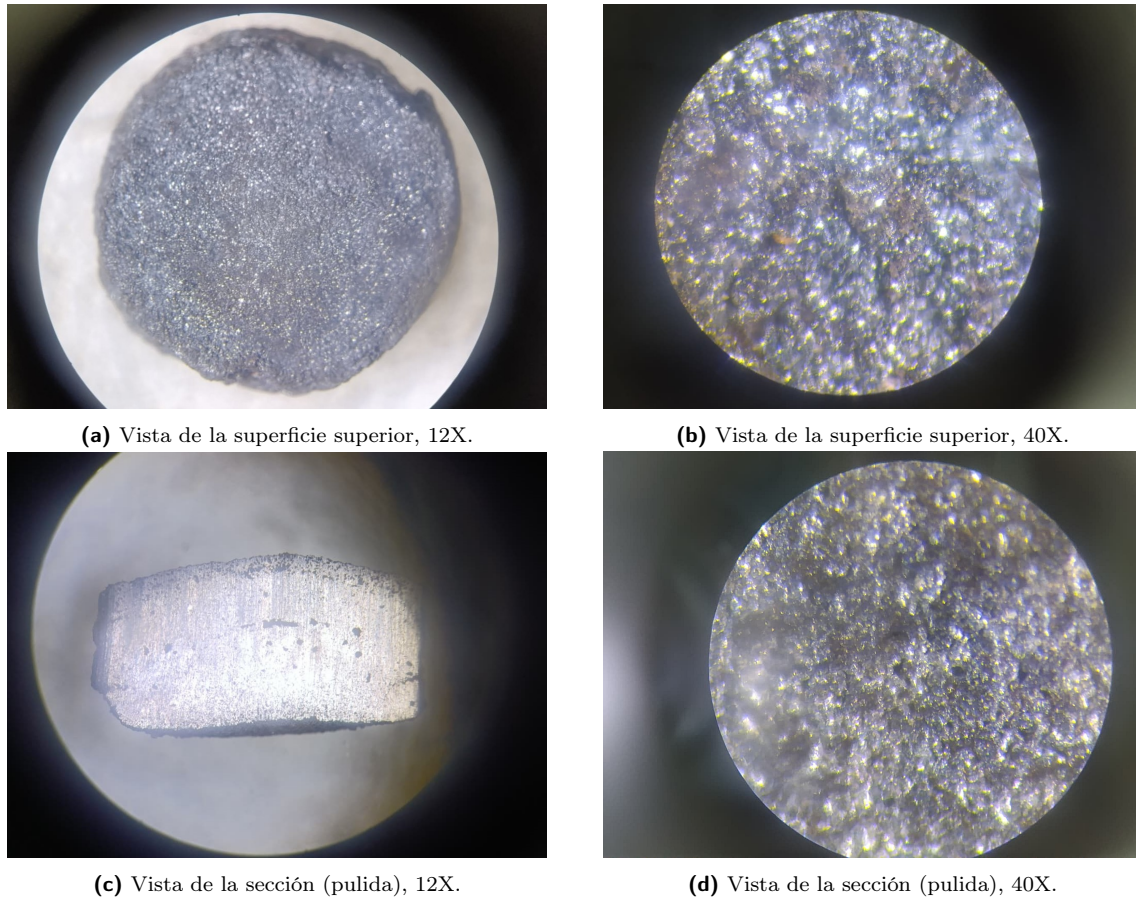


Figura 4.23. Vista al estereoscopio de la pieza de prueba seccionada.

densa, con menos posibilidades de falla, lo que determinó el éxito de la sinterización. Aun así, la presencia de poros es una característica intrínseca en las piezas obtenidas mediante el proceso base del Binder Jetting [45], en donde las densidades oscilan entre un 30 y 60 %.

4.6. Caracterización de las propiedades mecánicas

4.6.1. Ensayo de tracción

A pesar de la fractura observada en la zona de agarre de dos probetas, se determinó su usabilidad para el ensayo de tracción, dado que la sección calibrada, definida según la norma ASTM E8, no presentó daño ni deformación previa. Considerando el carácter exploratorio del estudio y la limitada disponibilidad de muestras, se procedió a ensayar las tres probetas con el fin de obtener información comparativa sobre el comportamiento mecánico del material sinterizado.

El ensayo de tracción se realizó de acuerdo con la norma ASTM E8, utilizando las tres probetas fabricadas mediante Metal Binder Jetting (MBJ) con polvo MET-CO 42C y sinterizadas a 1300 °C, siguiendo el ciclo térmico diseñado. Las probetas presentaron una sección transversal aproximada de $42 \pm 0,5 \text{ mm}^2$ y longitudes de 40,34 mm para la probeta I y 20 mm para las probetas II y III. Esta diferencia se debió al daño previo sufrido durante el sinterizado.

La Figura 4.24 presenta las curvas esfuerzo–deformación obtenidas. Los valores máximos registrados se encuentran entre 6 y 10 MPa, lo cual corresponde a entre 1 % y 2 % de la resistencia típica de un acero inoxidable martensítico densificado por sinterización convencional de 500–700 MPa según ASM Handbook [46], evidenciando que la matriz no desarrollo una unión metalúrgica suficiente.

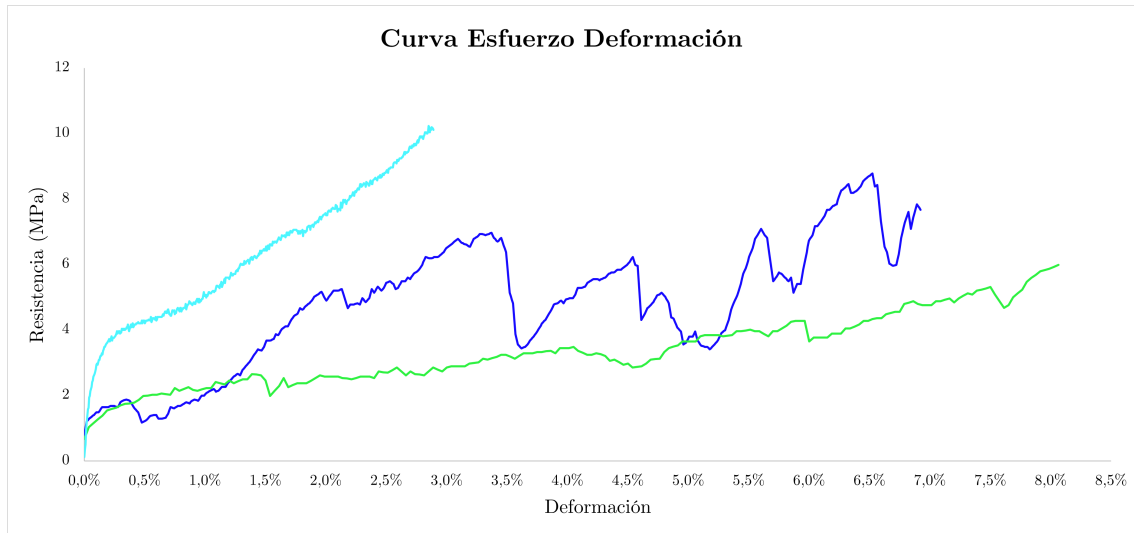


Figura 4.24. Curvas Esfuerzo deformación obtenidas.

Las curvas no presentan una región elástica claramente definida y exhiben un patrón irregular con múltiples picos y caídas, reflejando múltiples micro fracturas sucesivas entre partículas, característico de materiales frágiles y altamente porosos, con densidades por debajo del 60 %. No se observa un límite de fluencia identificable, y las probetas fallan de manera abrupta, sin mostrar deformación plástica, tal como se observa en la Figura 4.25.

Estos comportamientos están descritos en la literatura para piezas fabricadas por Binder Jetting cuando la densificación es insuficiente o la unión entre partículas es incompleta [47], [48].

Los valores obtenidos deben interpretarse en consideración al número reducido de probetas y a la obtención de todas ellas en una única sinterización. Por lo tanto, no se pretende establecer valores nominales, sino evidenciar el nivel de consolidación alcanzado mediante la ruta experimental implementada.

4.6.2. Prueba de impacto

El comportamiento a impacto se evaluó mediante los métodos Charpy e Izod, debido a la fragilidad de las probetas. La primera probeta se ensayó en un péndulo Charpy convencional, obteniéndose un valor de 0,05 kgm (aproximadamente 0,49 J). Este valor se encuentra por debajo del rango mínimo medible de la máquina empleada, lo cual indica que la probeta absorbió energía prácticamente nula antes de fracturar.

Dado lo anterior, las tres probetas adicionales se destinaron para el ensayo Izod en un equipo de baja energía en el Laboratorio de Materiales Poliméricos (energía



(a) Montaje para ensayo de tracción.



(b) Probetas utilizadas, sin evidencia de deformación plástica.

Figura 4.25. Ruptura de álabe en la pieza impeller.

disponible del péndulo: 21,716 J, con una incertidumbre de 0.1241 J). Los resultados obtenidos se registraron en la Tabla 4.4.

Probeta	Energía absorbida (J)	Energía específica (kJ/m ²)	Energía específica (J/m)
II	0,2041	2,222	21,47
III	0,0297	0,339	3,13
IV	—	—	—

Tabla 4.4. Resultados ensayo Izod.

Estos valores son muy bajos y muestran un comportamiento frágil de las muestras, que presentan energías dentro del rango típico de materiales sinterizados con densidades inferiores al 60 %, en los cuales la absorción de energía es mínima debido a la presencia de porosidad interconectada y falta de cohesión entre partículas [48], [49]. Investigaciones previas sobre MBJ muestran que la porosidad residual reduce de manera pronunciada la tenacidad al impacto y produce resultados inconsistentes en ensayos dinámicos, de acuerdo con lo expuesto por German [47].

La ausencia de deformación plástica y la fractura instantánea son coherentes con las observaciones microestructurales: cuellos incompletos o débiles y elevada porosidad interna [50]. El rango amplio entre probetas (0,0297 a 0,2041 J) evidencia una fuerte heterogeneidad local en el grado de sinterización, atribuible a diferencias tanto en la transferencia térmica durante el ciclo de sinterización como a variaciones en la densidad en verde originadas durante la impresión [51].

4.6.3. Medición de dureza

Para evaluar la resistencia local del material sinterizado se realizó un ensayo de dureza Rockwell A utilizando un penetrador cónico Brale. Se tomaron diez mediciones distribuidas en una zona superficial levemente pulida y nivelada que, mediante estereoscopia, mostró sinterización aparente, aunque con una porosidad significativa. En la Figura 4.26 se observa el montaje realizado y la pieza sometida a la prueba.



Figura 4.26. Impresión en verde de la pieza Impeller.

Los valores obtenidos oscilaron entre 41 y 61 HRA, con un valor promedio de 53 HRA. Tal como se registra en la Tabla 4.5. Este nivel de dureza se aproxima al de aceros martensíticos parcialmente endurecidos; sin embargo, en este caso, no corresponde a un fortalecimiento metalúrgico real, debido a la alta porosidad observada, la heterogeneidad del proceso de sinterización y la densificación limitada, mayormente en zonas superficiales [52].

Número	Dureza ± 1 HRA
1	54
3	45
4	56
5	50
6	54
7	50
8	54
9	61
10	61
11	41
Promedio	53

Tabla 4.5. Valores de dureza obtenidos.

La dispersión de las mediciones es indicativa de microestructuras no homogéneas. Estudios sobre metalurgia de polvos indican que la dureza pierde linealidad con respecto a la microestructura cuando la porosidad supera el 10–15 %, y puede mostrar variaciones abruptas cuando la porosidad es elevada [34], [53].

Estos resultados coinciden con las observaciones microscópicas: porosidad interconectada, cuellos parcialmente desarrollados, y refuerzan los hallazgos obtenidos

en tracción e impacto.

4.7. Anotaciones

El presente trabajo corresponde a una primera aproximación experimental a la implementación del proceso de Metal Binder Jetting en la Universidad del Valle. Si bien los resultados obtenidos no permitieron alcanzar una consolidación adecuada de las piezas fabricadas, estos proporcionaron información valiosa sobre las limitaciones del sistema, el comportamiento del polvo metálico y las condiciones térmicas requeridas para una sinterización efectiva.

Los resultados muestran que las partes impresas mediante el método Metal Binder Jetting expusieron baja resistencia mecánica, elevada porosidad, fragilidad al impacto y heterogeneidad en dureza. Las observaciones micrográficas tales como poros internos, zonas aglomeradas no sinterizadas, grietas profundas en el impeller, la distorsión geométrica por infiltración de binder y los problemas durante el sinterizado concuerdan con problemas recurrentes documentados en la literatura para Metal Binder Jetting, mencionando los aspectos puntuales:

Morfología y granulometría: La forma irregular y con bordes angulosos del METCO 42C y su distribución de tamaño de partícula claramente redujeron la densidad de empaquetamiento y la uniformidad del lecho, lo que contribuyó a una baja densidad en verde, problemas de esparcido de capas y mayor porosidad tras el sinterizado. Los estudios muestran que las mezclas bimodales y multimodales, además de una morfología esferoidal, mejoran notablemente la densidad de empaquetamiento y aumentan el área superficial de contacto entre partículas, mejorando así la densidad final y la resistencia de las piezas obtenidas. [7], [13], [18], [19], [35], [44], [54].

Saturación del Binder: La difusión del Binder y sus interacciones con las partículas como pueden ser la saturación, la adhesión y la evaporación entre capas explican el engrosamiento de alabes y el cierre del agujero central, demostrando que la selección de saturación y el control de secado entre capas son aspectos críticos a tener en cuenta durante el proceso de impresión [28], [37], [55], [56]. La saturación del Binder para este proyecto fue ajustada bajo la aceptación de los resultados preliminares de las pruebas iniciales, sin llegar a realizar impresiones completas, dada la limitación de recursos.

Sinterizado: Uno de los aspectos mas complejos y a la vez cruciales dentro del proceso de manufactura Metal Binder Jetting. La aparición de grietas, la estratificación en el sinterizado y el aislamiento de áreas con sinterización deficiente indican un Bedinding incompleto así como la existencia de gradientes térmicos que no permitieron alcanzar la densificación homogénea. La anisotropía de las piezas es otro aspecto mencionado a tener en cuenta, así como el estricto control de la atmósfera protectora [19], [38], [39], [48], [54]. La capacidad del equipo juega un papel crucial, ya que un reporte de temperatura por encima de la real, o una inconsistencia en los tiempos de sostenimiento no garantiza la ejecución de la curva de sinterización propuesto, ocasionando desfases que finalmente inciden en las propiedades obtenidas de las piezas.

La fractura observada durante la manipulación de la pieza se produjo en la región de mayor sección transversal, donde se identificaron zonas con apariencia verde y textura granular, evidenciando ausencia de sinterización efectiva en el núcleo de la pieza.

Capítulo 5

Conclusiones

El método de Binder Jetting utilizado en permitió obtener una deposición de aglutinante fiel a los modelos STL procesados gracias al correcto ajuste de parámetros obtenidos en las pruebas, pero la difusión del Binder a causa de la granulometría y la morfología del material de trabajo de trabajo (METCO 42C) derivó en una baja densidad de empaquetamiento, alteraciones dimensionales y pérdida de resolución en las piezas impresas en verde.

El poder aglutinante de la solución de Silicato de Sodio quedó confirmado al ligar las partículas eficazmente, de manera que se obtuvieron piezas en verde estables, soportando la extracción de la máquina y la limpieza inmediata.

El control de la infiltración del aglutinante podría mejorarse mediante el uso de polvos producidos especialmente para Binder Jetting, con morfología esférica y distribución granulométrica multimodal (Bimodal como mínimo), así como mediante la implementación de mejoras en el cabezal de inyección, con componentes comerciales que permitan un control más preciso del volumen de binder depositado. Sin embargo, la disponibilidad limitada de material de trabajo y de recursos para la adquisición de dichos componentes restringió la posibilidad de realizar iteraciones adicionales de mejoramiento, razón por la cual el fenómeno observado no pudo ser mitigado dentro del alcance del presente trabajo.

Los incidentes durante la sinterización generaron gradientes térmicos no esperados, causando fallas localizadas en el impeller, como la aglomeración presente en la parte baja central de la pieza. No se tuvo garantía de que el ciclo térmico realizado se llevara a cabo de acuerdo con la curva propuesta, toda vez que los componentes internos se vieron comprometidos durante la ejecución, con un equipo que se encontraba operando cerca de los límites permitidos definidos por el fabricante (1300°C), impidiendo iteraciones adicionales en el marco de este trabajo.

Consecuentemente, las bajas propiedades mecánicas de las piezas impresas quedaron determinadas por la baja densidad de empaquetamiento, la presencia de poros en toda la matriz de los elementos, la difusión del aglutinante y la sinterización heterogénea.

La imposibilidad de realizar iteraciones adicionales del proceso se debió principalmente a la limitada disponibilidad de polvo metálico, al alto costo del gas argón

necesario para la sinterización y a la posterior falla de la mufia de alta temperatura, única capaz de alcanzar las condiciones requeridas para el proceso. Estas restricciones impidieron la ejecución de ensayos adicionales orientados a la optimización del proceso.

5.1. Oportunidades de mejora

Selección de material de trabajo. Las características iniciales del material de trabajo condicionan el 50 % de los resultados finales, tal como se observó en el desarrollo de este proyecto, al hacer uso de un material originalmente diseñado para recubrimientos con Thermal Spray. La adquisición de uno o mas referencias de material formulado especialmente para procesos de manufactura aditiva con cama de polvo mejorará notablemente los resultados tanto de impresión como de sinterización. Adicionalmente, tal como se observa en el estudio de Do, Kwon y Shin [12], es posible elevar las posibilidades de las piezas impresas al adicionar uno o más materiales, beneficiando procedimientos como la sinterización.

Cabezal de impresión. Si bien la deposición de aglutinante con el cabezal de impresión construido fue precisa, la resolución y la eficacia del cabezal puede optimizarse al implementar dispositivos de inyección especializados, como los cartuchos de impresión, en donde se cuentan con múltiples boquillas con diámetros medidos en micras, que permiten obtener un control aún más preciso en la deposición, evitando la saturación de aglutinante y contribuyendo a reducir la difusión lateral de este.

Montaje de Sinterización. Como se mencionó anteriormente, la correcta planificación y ejecución de este proceso son claves para la obtención de piezas densas. En ese sentido, un equipo con la capacidad térmica adecuada y el control de atmósfera necesaria, es un requerimiento imperativo para la realización de futuros proyectos.

Al inicio de este trabajo, el costo de una impresora MBJ partía de aproximadamente 800.000 USD, tratándose de equipos altamente especializados y destinados casi exclusivamente a actividades de investigación y desarrollo, industria y producción a gran escala. Posteriormente, surgieron sistemas menos robustos, orientados a un público más amplio, con precios que descendieron hasta el orden de 200.000 USD. Al cierre de este proyecto, el equipo comercial más accesible disponible en el mercado presenta un costo cercano a 65.000 USD, correspondiendo a máquinas más compactas, de operación simple y orientadas a un público general, con la limitación de un volumen útil de impresión significativamente menor.

Las mejoras propuestas en el presente trabajo difícilmente superan los 1.000 USD, de acuerdo con el desarrollo experimental realizado, en el cual se intentó implementar dichas mejoras, sin resultados satisfactorios debido a limitaciones de recursos. Este escenario evidencia que, para la Universidad del Valle, resulta técnica y económicamente viable invertir en esta línea de investigación, dado que permitiría obtener beneficios tanto académicos como financieros, al generar nuevas oportunidades de

proyectos para estudiantes y grupos de investigación, así como capacidades internas en manufactura aditiva metálica.

Bibliografía

- [1] E. Dalpadulo, A. Petruccioli, F. Gherardini y F. Leali, «A Review of Automotive Spare-Part Reconstruction Based on Additive Manufacturing,» *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 6, n.º 6, 2022, ISSN: 2504-4494. DOI: [10.3390/jmmp6060133](https://doi.org/10.3390/jmmp6060133). dirección: <https://www.mdpi.com/2504-4494/6/6/133>.
- [2] S. Salifu, D. Desai, O. Ogunbiyi y K. Mwale, «Recent development in the additive manufacturing of polymer-based composites for automotive structures—a review,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, n.º 11, págs. 6877-6891, abr. de 2022, ISSN: 1433-3015. DOI: [10.1007/s00170-021-08569-z](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08569-z). dirección: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08569-z>.
- [3] J. C. Quiceno Jaramillo, «Evaluación del desarrollo de autopartes personalizadas utilizando procesos de manufactura aditiva,» Tesis de maestría., Universidad Autónoma de occidente, 2024. dirección: <https://hdl.handle.net/10614/15262>.
- [4] M. J. Kratzer, J. Mayer, F. Höfler y N. Urban, «Decision Support System for a Metal Additive Manufacturing Process Chain Design for the Automotive Industry,» en *Industrializing Additive Manufacturing*, M. Meboldt y C. Klahn, eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, págs. 469-482, ISBN: 978-3-030-54334-1.
- [5] F. Hernández y A. Fragoso, «Fabrication of a Stainless-Steel Pump Impeller by Integrated 3D Sand Printing and Casting: Mechanical Characterization and Performance Study in a Chemical Plant,» *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 7, 2022, ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app12073539](https://doi.org/10.3390/app12073539). dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3539>.
- [6] V. Sufiiarov, I. Polozov, A. Kantykov y A. Khaidorov, «Binder jetting additive manufacturing of 420 stainless steel: Densification during sintering and effect of heat treatment on microstructure and hardness,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 30, págs. 592-595, ene. de 2020, ISSN: 2214-7853. DOI: [10.1016/J.MATPR.2020.01.144](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.01.144).
- [7] C. S. Shin, T. Do, D. Lee et al., «A comparative study on mechanical properties of fully dense 420 stainless steel parts produced by modified binder jet printing,» *Materials and Design*, vol. 224, pág. 111343, dic. de 2022, ISSN: 0264-1275. DOI: [10.1016/J.MATDES.2022.111343](https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2022.111343).

- [8] Y. Wang, X. Liu, S. Fan et al., «Effect of heat treatment on microstructure and tensile property of 420 martensitic stainless steel produced by binder jetting additive manufacturing,» *Materials Letters*, vol. 354, pág. 135 429, ene. de 2024, ISSN: 0167-577X. DOI: [10.1016/J.MATLET.2023.135429](https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2023.135429).
- [9] H. Blunk y A. Seibel, «Design guidelines for metal binder jetting,» *Progress in Additive Manufacturing*, 2023, ISSN: 23639520. DOI: [10.1007/s40964-023-00475-y](https://doi.org/10.1007/s40964-023-00475-y).
- [10] M. Armstrong, H. Mehrabi y N. Naveed, «An overview of modern metal additive manufacturing technology,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 84, págs. 1001-1029, 2022, ISSN: 1526-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612522007459>.
- [11] T. C. AMT/8, «IBS EN ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing—general principles—terminology,» *Int. Stand.*, vol. 8, págs. 1-30, 2017.
- [12] T. Do, P. Kwon y C. S. Shin, «Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 121, págs. 50-60, oct. de 2017, ISSN: 0890-6955. DOI: [10.1016/J.IJMACHTOOLS.2017.04.006](https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2017.04.006).
- [13] W. Du, J. Roa, J. Hong, Y. Liu, Z. Pei y C. Ma, «Binder Jetting Additive Manufacturing: Effect of Particle Size Distribution on Density,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 143, n.º 9, pág. 091 002, mar. de 2021, ISSN: 1087-1357. DOI: [10.1115/1.4050306](https://doi.org/10.1115/1.4050306). eprint: https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-pdf/143/9/091002/6733718/manu_143_9_091002.pdf. dirección: <https://doi.org/10.1115/1.4050306>.
- [14] J. Marczyk, K. Ostrowska y M. Hebda, «Influence of binder jet 3D printing process parameters from irregular feedstock powder on final properties of Al parts,» *Advanced Powder Technology*, vol. 33, pág. 103 768, 11 nov. de 2022, ISSN: 0921-8831. DOI: [10.1016/J.APT.2022.103768](https://doi.org/10.1016/J.APT.2022.103768).
- [15] G. L. V. Bello, «Estudio del acero inoxidable pulvimetalúrgico 316 con adiciones de titanio y molibdeno,» Trabajo de grado para optar al título de Magister en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2018.
- [16] S. M. E. L., «Obtención de piezas metálicas mediante la pulvimetalurgia,» *Investigación y Desarrollo*, vol. 6, n.º 2, págs. 49-55, 2013. dirección: <https://revistas.uta.edu.ec/erevista/index.php/dide/article/view/58>.
- [17] A. Mostafaei, A. M. Elliott, J. E. Barnes et al., «Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges,» *Progress in Materials Science*, vol. 119, pág. 100 707, 2021, ISSN: 0079-6425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642520300712>.
- [18] A. Nouri y A. Sola, «Metal particle shape: A practical perspective,» *Metal Powder Report*, vol. 73, n.º 5, págs. 276-282, 2018, ISSN: 0026-0657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2018.04.001>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002606571830153X>.

- [19] T. Do, C. S. Shin, D. Stetsko et al., «Improving Structural Integrity with Boron-based Additives for 3D Printed 420 Stainless Steel,» *Procedia Manufacturing*, vol. 1, págs. 263-272, 2015, 43rd North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 43, 8-12 June 2015, UNC Charlotte, North Carolina, United States, ISSN: 2351-9789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.019>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915010197>.
- [20] Y. Tang, Z. Huang, J. Yang e Y. Xie, «Enhancing the Capillary Force of Binder-Jetting Printing Ti6Al4V and Mechanical Properties under High Temperature Sintering by Mixing Fine Powder,» *Metals*, vol. 10, n.º 10, 2020, ISSN: 2075-4701. DOI: [10.3390/met10101354](https://doi.org/10.3390/met10101354). dirección: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/10/1354>.
- [21] A. S. Basso y F. S. Conci, «Producción Conjunta de Silicato de Sodio y Derivados,» Tesis doct., Universidad Nacional de Córdoba, 2007.
- [22] m. Kermani, F. Hassani, E. Aflaki, M. Benzaazoua y M. Nokken, «Evaluation of the effect of sodium silicate addition to mine backfill, Gelfill - Part 1,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 7, abr. de 2015. DOI: [10.1016/j.jrmge.2015.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.006).
- [23] Y. A. Owusu, «Physical-chemistry study of sodium silicate as a foundry sand binder,» *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 18, n.º 1, págs. 57-91, 1982, ISSN: 0001-8686. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(82\)85031-8](https://doi.org/10.1016/0001-8686(82)85031-8). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0001868682850318>.
- [24] R. Ramakrishnan, B. Himmel, W. Volk, D. Günther y J. Günther, «3D Printing of Inorganic Sand Moulds for Casting Applications,» *Advanced Materials Research*, vol. 1018, págs. 441-449, sep. de 2014. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.441](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.441).
- [25] O. Tanane, Y. Abboud, H. Aitenneite y E. B. Abdeslam, «Corrosion inhibition of the 316L stainless steel in sodium hypochlorite media by sodium silicate,» *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 7, págs. 131-138, ene. de 2016.
- [26] H. Ali y M. A.-H. Gepreel, «Limitations and advancements of Sodium Silicate inorganic sand binders; A review,» en, *International Journal of Materials Technology and Innovation*, vol. 2, n.º 2, págs. 47-54, 2022. dirección: https://ijmti.journals.ekb.eg/article_275304_ee3906246d04529076b376c52342f087.pdf.
- [27] F. Wang, X. Cui, Q. Yang, H. Song y D. Li, «Fabrication and posttreatment for inorganic binder jetting sand molds for casting,» *Additive Manufacturing*, vol. 73, pág. 103690, 2023, ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103690>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860423003032>.
- [28] J. Glück, T. Dommaschk, D. Jüngst, J. Arimont, A. Schilling y M. Fehlbier, «Thermoanalytical Investigation of the Curing Kinetics of Sodium Silicate as an Inorganic Binder for 3D Sand Printing,» *Materials*, vol. 18, n.º 3, 2025, ISSN: 1996-1944. DOI: [10.3390/ma18030667](https://doi.org/10.3390/ma18030667). dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/3/667>.

- [29] *Malvern Mastersizer 2000*, Universitat De Valencia. (visitado 2024).
- [30] C. T. S.A.S, *Mufla multipropósito L2*, Accessed: 12-3-2025.
- [31] K. Gallardo, *Manual operativo del Horno eléctrico "Terrigeno"*, Español, ver. 001, Grupo de Investigación Fatiga y Superficies - Universidad del Valle, mayo de 2014, 10 págs., Publicado.
- [32] I. Hemmati, V. Ocelík y J. De Hosson, «Microstructural characterization of AISI 431 martensitic stainless steel laser-deposited coatings,» *Journal of Materials Science*, vol. 46, págs. 3405-3414, mayo de 2011. DOI: [10.1007/s10853-010-5229-2](https://doi.org/10.1007/s10853-010-5229-2).
- [33] B. Al-Mangour, «Powder metallurgy of stainless steel: State-of-the art, challenges, and development,» en ene. de 2015, págs. 37-80.
- [34] P. ANGELO, R. SUBRAMANIAN y B. Ravisankar, *POWDER METALLURGY, SECOND EDITION: SCIENCE, TECHNOLOGY AND APPLICATIONS*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2022, ISBN: 9789391818494. dirección: <https://books.google.com.co/books?id=XWabEAAAQBAJ>.
- [35] A. P. Clares, Y. Gao, R. Stebbins, A. C. van Duin y G. Manogharan, «Increasing density and mechanical performance of binder jetting processing through bimodal particle size distribution,» *MSAM*, vol. 1, n.º 3, pág. 20, 2022. DOI: [10.18063/msam.v1i3.20](https://doi.org/10.18063/msam.v1i3.20).
- [36] E. Klar y P. Samal, *Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, Microstructures, and Properties*. ASM International, 2007, ISBN: 9781615030521. dirección: <https://books.google.com.co/books?id=Hj272pDafAgC>.
- [37] X. Fang, Y. Zu, Q. Ma y J. Hu, «State of the art of metal powder bonded binder jetting printing technology,» *Discover Materials*, vol. 3, n.º 1, jun. de 2023. DOI: [10.1007/s43939-023-00050-w](https://doi.org/10.1007/s43939-023-00050-w).
- [38] Z. Lotfizarei, A. Mostafapour, A. Barari, A. Jalili y A. E. Patterson, «Overview of debinding methods for parts manufactured using powder material extrusion,» *Additive Manufacturing*, vol. 61, pág. 103 335, 2023, ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103335>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422007242>.
- [39] S. Bhandari, «Feasibility of rapid debinding and sintering of additively manufactured ceramics,» Tesis doct., University of Padova, mar. de 2025. DOI: [10.13140/RG.2.2.27605.95200](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27605.95200).
- [40] X. Wei, I. Behm, T. Winkler, S. Scharf, X. Li y R. Bähr, «Experimental Study on Metal Parts under Variable 3D Printing and Sintering Orientations Using Bronze/PLA Hybrid Filament Coupled with Fused Filament Fabrication,» *Materials*, vol. 15, n.º 15, 2022, ISSN: 1996-1944. DOI: [10.3390/ma15155333](https://doi.org/10.3390/ma15155333). dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/15/5333>.
- [41] A. M. Cheumani Yona, J. Žigon, S. Dahle y M. Petrič, «Study of the Adhesion of Silicate-Based Coating Formulations on a Wood Substrate,» *Coatings*, vol. 11, n.º 1, 2021, ISSN: 2079-6412. DOI: [10.3390/coatings11010061](https://doi.org/10.3390/coatings11010061). dirección: <https://www.mdpi.com/2079-6412/11/1/61>.

- [42] S. P. Asrafali, T. Periyasamy, S.-C. Kim y J.-W. Lee, «Enhanced Wettability and Adhesive Property of PTFE through Surface Modification with Fluorinated Compounds,» *Materials*, vol. 17, n.º 13, 2024, ISSN: 1996-1944. DOI: [10.3390/ma17133051](https://doi.org/10.3390/ma17133051). dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/13/3051>.
- [43] G. Miao, W. Du, Z. Pei y C. Ma, «A literature review on powder spreading in additive manufacturing,» *Additive Manufacturing*, vol. 58, pág. 103 029, 2022, ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103029>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422004213>.
- [44] C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall y A. J. Hart, «Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 266, págs. 484-501, abr. de 2019, ISSN: 0924-0136. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2018.10.037](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.037). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.037>.
- [45] N. Huang, O. J. Cook, J. D. Warner et al., «Effects of infiltration conditions on binder jet additively manufactured stainless steel infiltrated with bronze,» *Additive Manufacturing*, vol. 59, pág. 103 162, 2022, ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103162>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422005516>.
- [46] H. Kuhn y D. Medlin, eds., *Mechanical testing and evaluation*. ASM International, 2000.
- [47] R. M. German, «Chapter Six - Geometric Trajectories during Sintering,» en *Sintering: from Empirical Observations to Scientific Principles*, R. M. German, ed., Boston: Butterworth-Heinemann, 2014, págs. 141-181, ISBN: 978-0-12-401682-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401682-8.00006-9>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124016828000069>.
- [48] N. Lecis, M. Mariani, R. Beltrami et al., «Effects of process parameters, de-binding and sintering on the microstructure of 316L stainless steel produced by binder jetting,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 828, nov. de 2021, ISSN: 0921-5093. DOI: [10.1016/j.msea.2021.142108](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142108). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/J.MSEA.2021.142108>.
- [49] S. Mirzababaei y S. Pasebani, «A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel,» *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, n.º 3, 2019, ISSN: 2504-4494. DOI: [10.3390/jmmp3030082](https://doi.org/10.3390/jmmp3030082). dirección: <https://www.mdpi.com/2504-4494/3/3/82>.
- [50] F. Ternero, L. G. Rosa, P. Urban, J. M. Montes y F. G. Cuevas, «Influence of the Total Porosity on the Properties of Sintered Materials—A Review,» *Metals*, vol. 11, n.º 5, 2021, ISSN: 2075-4701. DOI: [10.3390/met11050730](https://doi.org/10.3390/met11050730). dirección: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/5/730>.

- [51] B. Zhu, R. Li, T. Yuan, W. Li, D. Cai y N. Kang, «Metal binder jetting additive manufacturing: An overview of the process, materials and reinforcement methods,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 1037, pág. 182 196, 2025, ISSN: 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182196>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838825037570>.
- [52] A. M. Fahim, T. Mikó, M. Z. Ahmed y Z. Gácsi, «Effect of cold compaction pressure and sintering temperature on the densification and microstructure of 316L stainless steel powder,» *Results in Engineering*, vol. 27, pág. 106 030, 2025, ISSN: 2590-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106030>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025021024>.
- [53] P. A. dePouitloff, «Secondary operations for Powder metallurgy stainless steels,» en *Powder Metallurgy*, ASM International, sep. de 2015, págs. 440-446.
- [54] R. German, «Thinking about metal Binder Jetting or FFF? Here is (almost) everything you need to know about sintering,» *Metal AM*, vol. 5, n.º 3, págs. 127-139, 2019. dirección: <https://www.metal-am.com/articles/thinking-about-metal-binder-jetting-or-fff-here-is-almost-everything-you-need-to-know-about-sintering/>.
- [55] N. B. Crane, «Impact of part thickness and drying conditions on saturation limits in binder jet additive manufacturing,» *Additive Manufacturing*, vol. 33, pág. 101 127, mayo de 2020, ISSN: 2214-8604. DOI: [10.1016/j.addma.2020.101127](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101127). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101127>.
- [56] H. Tan, «Three-dimensional simulation of micrometer-sized droplet impact and penetration into the powder bed,» *Chemical Engineering Science*, vol. 153, págs. 93-107, 2016, ISSN: 0009-2509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.015>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250916303803>.

Anexos

5.2. Código del segmentador

```
1  #OBTENCIÓN DE UN IMPELLER MEDIANTE LA TÉCNICA METAL BINDER JETTING CON
   ↳ ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO
2  #JOSE HOYOS 1927835
3  print(f"-----")
4  print(f"-----")
5  print(f"Segmenta OBJ en G-code raster (línea a línea) para impresora
   ↳ Binder Jetting.")
6  print(f"Añade rutina de esparcido de polvo y mantiene inyección
   ↳ constante.")
7  print(f"Compatible con Repetier Host.")
8  print(f"Autor: Jose Hoyos")
9  print(f"Fecha: OCTUBRE 2025")
10 print(f"-----")
11 print(f"-----")
12 import os
13 import numpy as np
14 from datetime import datetime
15 import trimesh
16 from shapely.geometry import LineString, Polygon, MultiPolygon
17 from shapely.ops import unary_union
18
19 # ===== CONFIGURACIÓN =====
20 INPUT_PATH = "./input"          #Carpeta de archivos de entrada
21 OUTPUT_PATH = "./output"       #Carpeta de archivos de salida
22
23 # Dimensiones de la máquina
24 MACHINE_X_MIN = 70.0
25 MACHINE_X_MAX = 280.0
26 MACHINE_Y_MIN = 60.0
27 MACHINE_Y_MAX = 280.0
28 MACHINE_Z_MAX = 140.0
29
30 # Parámetros de impresión a ingresar
31 layer_height = float(input("Ingrese altura de capa a segmentar [mm]: "))
32 step_y = float(input("\nIngrese avance entre líneas (Y)[mm]: "))
33 extrusion_rate = float(input("\nDefina tasa de extrusión uniforme [mm
   ↳ Extruidos por milimetro desplazado]: "))
34 feedrate = float(input("\nIngrese velocidad de extrusión [mm/min]: "))
```

```

35 travel_feedrate = float(input("\nIngrese velocidad de desplazamiento
    ↳ [mm/min]: "))
36
37
38 # ===== COMANDOS DE ESPARCIDO =====
39 def comandos_tolva(next_e):
40     return (
41         f"; --- RUTINA DE ESPARCIDO ---\n"
42         f"G92 E{next_e:.5f}\n"
43         "G0 F2000 X0 Y0\n"
44         "G0 F2000 Y412.9\n"
45         "M0 S6\n"
46         "G0 F700 Y0\n"
47         "G0 F2000 Y412.9\n"
48         "M0 S6\n"
49         "G0 F700 Y0\n"
50         "G0 F2000 Y412.9\n"
51         "M0 S6\n"
52         "G0 F600 Y0\n"
53         "; --- FIN RUTINA ---\n"
54     )
55
56
57 # ===== UTILIDADES =====
58 def ensure_dirs():
59     os.makedirs(INPUT_PATH, exist_ok=True)           #Garantiza existencia de
    ↳ carpetas de entrada y salida
60     os.makedirs(OUTPUT_PATH, exist_ok=True)
61
62
63 def select_input_file():                             #Busca los archivos con
    ↳ extensión .STL o .OBJ
64     files = [f for f in os.listdir(INPUT_PATH) if
    ↳ f.lower().endswith((".stl", ".obj"))]
65     if not files:
66         print("No se encontró ningún archivo STL u OBJ en ./input/")
67         return None
68
69     print("\nArchivos disponibles en ./input:") #Muestra los archivos
    ↳ hallados
70     for i, f in enumerate(files):
71         print(f"[{i}] {f}")
72
73     try:                                             #Selección de archivo
    ↳ deseado
74         sel = int(input("\nSeleccione el número del archivo a procesar:
    ↳ "))
75         selected = files[sel]
76     except (ValueError, IndexError):
77         print("Selección inválida. Se usará el primer archivo
    ↳ encontrado.")

```

```

78         selected = files[0]
79
80     return os.path.join(INPUT_PATH, selected)
81
82
83     # ===== SLICER PRINCIPAL =====
84     def slice_and_raster(input_file, output_file):
85         print(f"\nCargando modelo: {input_file}")    #Carga de modelo
86         mesh = trimesh.load(input_file, force='mesh')
87
88         print("→ Reparando malla...")
89         try:
90             import trimesh.repair as repair
91             repair.fix_inversion(mesh)
92             repair.fill_holes(mesh)                    #Verificación de archivo
93             print("Reparación completa")
94         except Exception as e:
95             print(f"Reparación básica ({e})")
96
97         bbox = mesh.bounds
98         x_min0, y_min0, z_min0 = bbox[0]
99         x_max0, y_max0, z_max0 = bbox[1]                #Cálculo de dimensiones
100         ↪ del modelo cargado
101
102     # --- Cálculo de centrado real dentro de cama útil ---
103     model_width_x = x_max0 - x_min0
104     model_width_y = y_max0 - y_min0
105
106     # Centros de la cama útil
107     bed_center_x = (MACHINE_X_MIN + MACHINE_X_MAX) / 2.0
108     bed_center_y = (MACHINE_Y_MIN + MACHINE_Y_MAX) / 2.0
109
110     # Coordenadas del centro geométrico del modelo
111     model_center_x = (x_min0 + x_max0) / 2.0
112     model_center_y = (y_min0 + y_max0) / 2.0
113
114     # Desplazamiento para centrar dentro del área útil
115     offset_x = bed_center_x - (model_center_x - x_min0)
116     offset_y = bed_center_y - (model_center_y - y_min0)
117
118     # Ajuste manual fijo (posición óptima comprobada)
119     offset_x += 40.0
120     offset_y += 40.0
121
122     # Verificación de márgenes
123     if offset_x < MACHINE_X_MIN:
124         offset_x = MACHINE_X_MIN
125     if offset_y < MACHINE_Y_MIN:
126         offset_y = MACHINE_Y_MIN
127
128     gcode = []                                          #Generación de código G

```

```

128 gcode.append("; === G-code generado por Binder Slicer Trimesh v2.2
    ↪ ===\n")
129 gcode.append(f"; Modelo: {os.path.basename(input_file)}\n")
130 gcode.append(f"; layer_height={layer_height} step_y={step_y}\n")
131 gcode.append("M302 S0\nG90\nM82\nG92 E0\n\n")
132
133 e_total = 0.0
134 z = z_min0 + layer_height / 2.0
135 layer_index = 0
136
137 while z <= z_max0 + 1e-6: #Procesado capa por capa
138     section = mesh.section(plane_origin=[0, 0, z], plane_normal=[0, 0,
    ↪ 1])
139     if section is None:
140         z += layer_height
141         layer_index += 1
142         continue
143
144     try:
145         if hasattr(section, "to_2D"):
146             planar, _ = section.to_2D()
147         else:
148             planar, _ = section.to_planar()
149         polys = planar.polygons_full
150     except Exception:
151         polys = []
152
153     if not polys:
154         z += layer_height
155         layer_index += 1
156         continue
157
158     try:
159         unified = unary_union(polys)
160     except Exception:
161         unified = polys[0]
162
163     if unified.is_empty:
164         z += layer_height
165         layer_index += 1
166         continue
167
168     if isinstance(unified, Polygon):
169         poly_list = [unified]
170     elif isinstance(unified, MultiPolygon):
171         poly_list = list(unified.geoms)
172     else:
173         poly_list = []
174
175     if not poly_list:
176         z += layer_height

```

```

177         layer_index += 1
178         continue
179
180     # --- GCODE DE CAPA ---
181     gcode.append(f"; --- CAPA {layer_index} Z={z:.3f} ---\n")
182     gcode.append(f"G0 F{travel_feedrate} Z{z + 0.05:.3f}\n")
183     gcode.append(comandos_tolva(e_total))
184
185     minx, miny, maxx, maxy = unified.bounds
186     y = miny
187     invertir = False
188
189     while y <= maxy:
190         line = LineString([(minx, y), (maxx, y)])
191         inter = unified.intersection(line)
192
193         if inter.is_empty:
194             y += step_y
195             continue
196
197         segments = []
198         if isinstance(inter, LineString):
199             coords = list(inter.coords)
200             segments = [(coords[0], coords[-1])]
201         elif hasattr(inter, "geoms"):
202             for g in inter.geoms:
203                 if isinstance(g, LineString):
204                     coords = list(g.coords)
205                     segments.append((coords[0], coords[-1]))
206
207         for (xa, ya), (xb, yb) in segments:
208             xs = xa + offset_x
209             xe = xb + offset_x
210             yy = y + offset_y
211             if invertir:
212                 xs, xe = xe, xs
213             dist = abs(xe - xs)
214             if dist < 1e-6:
215                 continue
216
217             gcode.append(f"G0 F{travel_feedrate} X{xs:.3f}
218 ↪ Y{yy:.3f}\n")
219             e_total += extrusion_rate * dist
220             gcode.append(f"G1 F{feedrate} X{xe:.3f} Y{yy:.3f}
221 ↪ E{e_total:.5f}\n")
222
223         y += step_y
224         invertir = not invertir
225
226     z += layer_height
227     layer_index += 1

```

```

226
227 gcode.append("\n; --- Fin de archivo ---\nG0
    ↪ Z{:.3f}\nM84\n".format(z_max0 + 10))
228 with open(output_file, "w", encoding="latin-1") as f:
229     f.writelines(gcode)
230
231 print(f"\nArchivo G-code generado con éxito: {output_file}")
232
233
234 # ===== EJECUCIÓN PRINCIPAL =====
235 def main():
236     ensure_dirs()
237     input_file = select_input_file()
238     if not input_file:
239         return
240     timestamp = datetime.now().strftime("%Y_%m_%d_%H_%M") #Generación y
    ↪ guardado de gcode con fecha y hora
241     output_name = os.path.splitext(os.path.basename(input_file))[0] +
    ↪ f"_binderjet_v2_2_{timestamp}.gcode"
242     output_file = os.path.join(OUTPUT_PATH, output_name)
243     slice_and_raster(input_file, output_file)
244
245
246 if __name__ == "__main__":
247     main()

```