

TRABAJO FIN DE MÁSTER

# IMPRESIÓN 3D MEDIANTE TECNOLOGÍA DED POR FUSIÓN LÁSER DE ALAMBRE METÁLICO

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
PARA LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MÁSTER EN  
INGENIERÍA MECÁNICA

JULIO 2025

**Alejandro González Pérez**

DIRECTORES DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

**Jon Molina-Aldareguia**

**Andrea Fernández Gorgojo**







UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

---

IMPRESIÓN 3D MEDIANTE TECNOLOGÍA DED POR  
FUSIÓN LÁSER DE ALAMBRE METÁLICO

---

*Máster en Ingeniería Mecánica*

**Alejandro González Pérez**

Directores del Trabajo Fin de Máster:

Jon Molina-Aldareguia  
Andrea Fernández Gorgojo

Madrid, julio de 2025



*“Algunas personas quieren que algo ocurra, otras lo sueñan, otras hacen que suceda”*

- Michael Jordan



## AGRADECIMIENTOS

Este máster y en especial el TFM que he elegido me han abierto aún más los ojos hacia una parte del sector industrial que pocos pueden tener la suerte de experimentar. El mundo de la investigación siempre es enriquecedor, pero si encima tienes la oportunidad de investigar sobre un tema que despierta tanto interés en mí, como es la fabricación aditiva, también se convierte en un proceso de aprendizaje bonito. Con este trabajo he querido salir de mi "zona de confort" para poder desarrollarme como profesional y como persona, y no hubiera sido posible sin la ayuda de todos vosotros.

Quiero empezar dando las gracias a mis dos directores de proyecto. Gracias Jon por ser el facilitador de todo esto. Sin ti no hubiera sido posible ir un paso más allá en la parte experimental, lo que ha supuesto para mí una de las experiencias más enriquecedoras del proceso. Además, gracias Andrea por estar todo el día pendiente de la evolución del trabajo, por el apoyo en las "semanas más oscuras" de la máquina y por estar dispuesta a ayudar siempre que fue necesario.

Quiero agradecer también la labor y el apoyo del resto de los miembros del laboratorio y, en especial, a Álvaro por ser una persona muy cercana conmigo desde el primer día que entré y a Ramón por sacrificar y adaptar el resto de sus tareas para echarme una mano siempre que lo necesité.

Marina, a ti quiero agradecerte tu apoyo incondicional durante todo el proceso. Las alegrías y celebraciones cuando las cosas han ido bien y el apoyo y la empatía cuando lo necesité en los momentos más duros del proceso. Como digo siempre... gracias por querer montar conmigo en esta montaña rusa que es la vida. Además, también quiero agradecer a mis padres y a mi hermano, no solo por apoyarme en todo momento, sino también por ser una 'piña' ahora que es cuando más lo necesitamos y pese a estar lejos de casa. Por último, pero no menos importante, gracias, Pili, por ser la amiga que todo el mundo querría tener, por preocuparte por los problemas de otros y alegrarte de sus éxitos como si fueran propios.

Este trabajo ha supuesto para mí el cierre de una etapa. Pese a dejar de ser un estudiante que tiene que preparar exámenes para sacar la mejor nota posible, me gustaría ser un profesional en un proceso continuo de aprendizaje y formación. Ahora no sé lo que vendrá, pero sí que tengo claro que lo afrontaré como siempre, con esfuerzo, pasión y más esfuerzo.

## AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Gracias al Laboratorio de Fabricación de la ETSI Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, por proporcionar las instalaciones y todos los sistemas y materiales necesarios para la consecución de este proyecto.

Además, gracias al Instituto IMDEA Materiales por proporcionar las instalaciones y todos los equipos de preparación y ensayo necesarios para la realización de la parte experimental de este proyecto.



## RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster aborda la fabricación aditiva avanzada, centrándose en el análisis y caracterización de un sistema de Deposición Directa de Energía (DED) con tecnología láser y alimentación por filamento metálico. El proyecto tiene como motivación impulsar la aplicación de la fabricación aditiva multimaterial, respondiendo a los retos de calidad y eficiencia en los procesos DED. Sus objetivos principales son caracterizar el sistema, optimizar los parámetros de fabricación y validar su uso en entornos industriales reales.

Primero, se realizará una caracterización inicial del sistema basada en normativa técnica y parámetros del fabricante. Esto se complementará con un estudio experimental de porosidad interna mediante microscopía óptica para evaluar la calidad de probetas fabricadas bajo diferentes perfiles de proceso.

Luego, se desarrollará una estrategia de optimización para la fabricación multimaterial, utilizando un análisis iterativo sobre la porosidad en las zonas de la interfase. Este análisis, apoyado en microscopía óptica, permitirá ajustar los parámetros para mejorar la unión entre los materiales empleados. Además, se estudiará la microestructura con microscopía electrónica de barrido (SEM), evaluando las zonas estables y próximas a las interfases para comprender el comportamiento metalúrgico del proceso.

Como aplicación, se fabricará una pieza industrial mediante un proceso híbrido, combinando fabricación aditiva de una preforma y su mecanizado posterior. Esta estrategia validará la capacidad del sistema para generar componentes funcionales y servirá de referencia frente a procesos tradicionales.

Los resultados permitirán identificar los perfiles de proceso óptimos en calidad y eficiencia, demostrando la viabilidad de sistemas DED híbridos en entornos industriales reales. En conjunto, el trabajo contribuirá al conocimiento y mejora de tecnologías de fabricación aditiva multimaterial para la industria avanzada.

## **PALABRAS CLAVE**

Fabricación aditiva, sistemas DED, filamento metálico, procesos híbridos, fabricación multimaterial, porosidad interna, interfases.

## **CÓDIGOS UNESCO**

220304 - Microscopía electrónica  
331000 - Tecnología industrial  
331088 - Impresión 3D  
331208 - Propiedades de los materiales  
331212 - Ensayo de materiales  
331255 - Fabricación aditiva, prototipado rápido  
331290 - Materiales metalúrgicos avanzados  
331592 - Procesado de materiales metálicos

## ABSTRACT

This Master's Thesis focuses on advanced additive manufacturing, specifically analyzing and characterizing a DED ('Directed Energy Deposition') system using laser technology with metallic filament feed. The project is motivated by the aim of advancing multimaterial additive manufacturing, addressing current challenges in quality and efficiency of DED processes. Its main objectives are to characterize the system, optimize manufacturing parameters, and validate its use in real industrial environments.

Initially, the system is characterized based on technical standards and manufacturer-defined parameters. This is complemented by an experimental study of internal porosity using optical microscopy to evaluate the quality of test specimens made under different process profiles.

Next, an optimization strategy for multimaterial fabrication is developed using an iterative analysis of porosity at the interface zones. Supported by optical microscopy, this analysis allows adjusting parameters to improve bonding between different materials. Additionally, microstructure is studied using scanning electron microscopy (SEM), assessing stable areas and regions near interfaces to understand the metallurgical behavior.

As a practical application, an industrial geometry part is fabricated via a hybrid process, combining additive manufacturing of a preform with subsequent machining. This strategy validates the system's ability to produce functional components and serves as a benchmark against traditional manufacturing.

The results identify optimal process profiles for internal quality and efficiency, demonstrating the feasibility of hybrid DED systems in real industrial environments. Overall, the work contributes significant knowledge to multimaterial additive manufacturing technologies and advances their practical applications in advanced industry.



“Plantilla en LaTeX acorde con la Normativa para la elaboración de informes de TFT de la ETSII (UPM)” by Javier Soto Pérez-Olivares is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XIV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. SISTEMAS DE DEPOSICIÓN DIRECTA DE ENERGÍA . . . . .	2
1.2. MARCO DEL PROYECTO . . . . .	6
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>8</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>9</b>
<b>4. FUNDAMENTO TEÓRICO</b>	<b>11</b>
4.1. DENSIDAD DE ENERGÍA DEL PROCESO . . . . .	11
<b>5. CAPÍTULO 1: CARACTERIZACIÓN BÁSICA</b>	<b>12</b>
5.1. METODOLOGÍA . . . . .	12
5.1.1. EQUIPO DE IMPRESIÓN EMPLEADO . . . . .	12
5.1.2. ENSAYOS BAJO NORMA ISO 52902:2023 . . . . .	14
5.1.3. ENSAYOS CON PERFILES DE PROCESO NORMALIZADOS . . . . .	17
5.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN . . . . .	21
5.2.1. ENSAYOS BAJO NORMA ISO 52902:2023 . . . . .	21
5.2.2. ENSAYOS CON PERFILES DE PROCESO NORMALIZADOS . . . . .	25
5.3. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS . . . . .	26
<b>6. CAPÍTULO 2: IMPRESIÓN MULTIMATERIAL</b>	<b>29</b>

6.1. METODOLOGÍA . . . . .	29
6.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN . . . . .	31
6.2.1. ITERACIÓN 1 . . . . .	32
6.2.2. ITERACIÓN 2 . . . . .	34
6.2.3. ITERACIÓN 3 . . . . .	35
6.2.4. ITERACIÓN 4 . . . . .	37
6.2.5. ITERACIÓN 5 . . . . .	39
6.2.6. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL . . . . .	41
6.3. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS . . . . .	50
<b>7. CAPÍTULO 3: DEMOSTRADOR DE TIPO INDUSTRIAL</b>	<b>52</b>
7.1. METODOLOGÍA . . . . .	52
7.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN . . . . .	55
7.3. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS . . . . .	57
<b>8. PLANIFICACIÓN TEMPORAL</b>	<b>58</b>
<b>9. PRESUPUESTO DEL PROYECTO</b>	<b>61</b>
9.1. PRESUPUESTO GENERAL . . . . .	61
9.2. GASTOS DE PERSONAL . . . . .	61
9.3. GASTOS EN AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS . . . . .	62
9.4. GASTOS EN FUNGIBLES . . . . .	62
9.5. LICENCIAS DE SOFTWARE . . . . .	62
<b>10. EVALUACIÓN DE IMPACTOS Y CONTRIBUCIÓN A ODS</b>	<b>63</b>
10.1. EVALUACIÓN DE IMPACTOS . . . . .	63
10.2. CONTRIBUCIÓN A LOS ODS . . . . .	64
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>75</b>
A. PRIMER ANEXO . . . . .	75

B. SEGUNDO ANEXO . . . . . 78



## ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Comparación entre tecnologías DED según fuente de energía (ASTM-F3187-16, 2016) (siendo 4 la valoración más alta y 1 la más baja). . . . .	3
5.1. Tasas de deposición alcanzables según fabricante (Meltio, s.f.). . . . .	18
5.2. Parámetros de impresión principales para los perfiles preconfigurados por el fabricante. . . . .	19
5.3. Resumen de los resultados del análisis de la porosidad interna de las probetas fabricadas con perfiles preconfigurados. . . . .	25
6.1. Parámetros de impresión principales para la Iteración 1 de impresión multimaterial. . . . .	32
6.2. Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 1. . . . .	33
6.3. Parámetros de impresión principales para la Iteración 2 de impresión multimaterial. . . . .	34
6.4. Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 2. . . . .	35
6.5. Parámetros de impresión principales para la Iteración 3 de impresión multimaterial. . . . .	36
6.6. Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 3. . . . .	37
6.7. Parámetros de impresión principales para la Iteración 4 de impresión multimaterial. . . . .	37
6.8. Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 4. . . . .	38
6.9. Parámetros de impresión principales para la Iteración 5 de impresión multimaterial. . . . .	39
6.10. Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 5. . . . .	40
7.1. Comparativa de costes y tiempos de fabricación entre ambos sistemas considerados. . . . .	56
8.1. Descomposición de tareas del proyecto. . . . .	59
9.1. Presupuesto general del proyecto. . . . .	61
9.2. Partida para gastos de personal. . . . .	61
9.3. Partida para gastos en amortización de equipos. . . . .	62
9.4. Partida para gastos en fungibles. . . . .	62
9.5. Partida para gastos en licencias de software. . . . .	62
A.1. Medidas obtenidas para el artefacto lineal para la calibración del eje X. . . . .	75
A.2. Medidas obtenidas para el artefacto lineal para la calibración del eje Y. . . . .	75
A.3. Medidas obtenidas para el artefacto para la calibración del eje Z. . . . .	76
A.4. Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de pines. . . . .	76

A.5. Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de agujeros. . . . .	76
A.6. Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de nervios. . . . .	76
A.7. Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de ranuras. . . . .	77
B.1: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero inoxidable y perfil 'Utility'. . . . .	79
B.2: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero inoxidable y perfil 'Verified Density'. . . . .	79
B.3: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero blando y perfil 'Utility'. . . . .	80
B.4: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero blando y perfil 'Verified Density'. . . . .	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

5.1. Diagrama sobre la metodología aplicada en el Capítulo 1 (Elaboración propia). . .	12
5.2. Equipo de impresión DED Meltio M450 (Elaboración propia). . . . .	13
5.3. Equipo de refrigeración líquida incluido (Elaboración propia). . . . .	13
5.4. Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos propuestos por la norma ISO 52902:2023 (Elaboración propia). . . . .	16
5.5. Probetas fabricadas en ambos materiales y con los perfiles preconfigurados por el fabricante (Elaboración propia). . . . .	19
5.6. Equipo de corte de precisión empleado para la preparación de las probetas (Elaboración propia). . . . .	20
5.7. Equipo de pulido manual empleado para la preparación de las probetas (Elaboración propia). . . . .	21
5.8. Resultado del proceso de preparación de las superficies de observación de las probetas fabricadas con los perfiles preconfigurados (Elaboración propia). . . . .	21
5.9. Artefactos de la norma ISO 52902:2023 impresos: artefacto lineal (A), artefacto para el eje Z (B), artefacto para la resolución de pasadores (C), artefacto para la resolución de agujeros (D), artefacto para la resolución de nervios (E), artefacto para la resolución de ranuras (F) y artefacto para el estudio del acabado superficial. (Elaboración propia). . . . .	22
5.10. Desviaciones dimensionales sobre el artefacto lineal para la calibración del eje X e Y (Código A) (Elaboración propia). . . . .	23
5.11. Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la calibración del eje Z (Código B) (Elaboración propia). . . . .	23
5.12. Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de pines (Código C) (Elaboración propia). . . . .	24
5.13. Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de agujeros (Código D) (Elaboración propia). . . . .	24
5.14. Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de nervios (Código E) (Elaboración propia). . . . .	24
5.15. Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de ranuras (Código F) (Elaboración propia). . . . .	25
5.16. Sección de la superficie de observación de la probeta de acero blando fabricada con perfil de tipo 'Verified Density' (Elaboración propia). . . . .	26
6.1. Diagrama sobre la metodología aplicada en el Capítulo 2 (Elaboración propia). . .	29
6.2. Diseño de probeta tipo vóxel para el estudio de las operaciones de impresión multimaterial (Elaboración propia). . . . .	30

6.3. Equipo SEM empleado para el estudio de la microestructura de las probetas (Elaboración propia). . . . .	31
6.4. Probeta fabricada para la iteración 1 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia). . . . .	32
6.5. Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 1, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia). . . . .	33
6.6. Probeta fabricada para la iteración 2 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia). . . . .	34
6.7. Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 2, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia). . . . .	34
6.8. Probeta fabricada para la iteración 3 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia). . . . .	36
6.9. Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 3, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia). . . . .	36
6.10. Probeta fabricada para la iteración 4 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia). . . . .	38
6.11. Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 4, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia). . . . .	38
6.12. Probeta fabricada para la iteración 5 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia). . . . .	39
6.13. Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 5, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia). . . . .	40
6.14. Microestructuras observadas en la interfase de la probeta de la iteración 1 (Elaboración propia). . . . .	42
6.15. Microestructuras observadas en la interfase de la probeta de la iteración 2 (Elaboración propia). . . . .	43
6.16. Estudio de la evolución microestructural a lo largo de las interfases de la probeta de la iteración 3 (Elaboración propia). . . . .	46
6.17. Explicación esquemática de los sucesos observados sobre las microestructuras de las probetas multimaterial (Elaboración propia). . . . .	47
6.18. Análisis de la composición química de la interfase horizontal en la deposición de acero blando sobre acero inoxidable (Elaboración propia). . . . .	48

6.19. Análisis de la composición química de la interfase horizontal en la deposición de acero inoxidable sobre acero blando (Elaboración propia). . . . .	48
6.20. Análisis lineal (sobre 'Line Data 1') de la composición química de la interfase horizontal en la deposición de acero inoxidable sobre acero blando. Leyenda de los elementos principales: hierro (azul), cromo (verde), níquel (rosa), manganeso (rojo) y silicio (amarillo) (Elaboración propia). . . . .	49
6.21. Explicación esquemática de los sucesos observados sobre la composición química de las probetas multimaterial (Elaboración propia). . . . .	50
7.1. Diagrama sobre la metodología aplicada en el Capítulo 3 (Elaboración propia). . . . .	52
7.2. Localización de la mangueta (1) dentro del sistema de suspensión y dirección del vehículo (LaSuspensión, s.f.). . . . .	53
7.3. Geometría de la mangueta de la que se partirá en esta fase del proyecto (Elaboración propia). . . . .	53
7.4. Diseño de la geometría de la preforma a fabricar (Elaboración propia). . . . .	54
7.5. Mangueta obtenida de la preforma DED a partir de operaciones de mecanizado en sistema de fabricación híbrida (Elaboración propia). . . . .	55
7.6. Defecto por falta de fusión en capas intermedias del modelo, que ha paralizado el proceso de impresión (Elaboración propia). . . . .	56
8.1. Diagrama tipo Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP) (Elaboración propia). . . . .	58
8.2. Diagrama de Gantt del proyecto (Elaboración propia). . . . .	60
B.1. Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero inoxidable con perfil 'Utility' (Elaboración propia). . . . .	78
B.2. Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero inoxidable con perfil 'Verified Density' (Elaboración propia). . . . .	78
B.3. Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero blando con perfil 'Utility' (Elaboración propia). . . . .	78
B.4. Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero blando con perfil 'Verified Density' (Elaboración propia). . . . .	79



## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel global, las tecnologías de fabricación aditiva están creciendo significativamente frente a otros métodos más tradicionales, como las técnicas sustractivas o de moldeo, gracias a su optimización de costes, mayor rapidez, mejora en la calidad, potencial innovador y alto impacto en la industria (Attaran, 2017). En el sector metálico, estas tecnologías posibilitan una alta flexibilidad de diseño y la fabricación de geometrías complejas y estructuras personalizadas, al mismo tiempo que optimizan recursos y reducen significativamente los costes del proceso (Kennedy et al., 2024). Además, muchas de estas tecnologías permiten la fabricación simultánea con diversos metales o aleaciones en una misma operación, posibilitando la creación de geometrías con propiedades mecánicas mejoradas gracias a la combinación de dichos materiales (L. Liu et al., 2025).

En concreto, la tecnología de Deposición Directa de Energía (DED) destaca al lograr que las piezas resultantes tengan propiedades mecánicas comparables a las obtenidas mediante procesos sustractivos, pero a partir de operaciones más rápidas, económicas y con una menor generación de residuos. (Era et al., 2023). La versatilidad de estos sistemas se potencia al integrarse con técnicas de mecanizado por arranque de material (fabricación híbrida), complementando las propiedades de ambos procesos para obtener piezas que además tienen alta precisión dimensional en sus zonas críticas (Kumaran y Ravi, 2024).

Las tecnologías de fabricación aditiva se definen como métodos para crear objetos a partir de modelos digitales en 3D mediante la superposición sucesiva de capas (ISO-52900, 2022). Este principio se extiende a la mayoría de los procesos de la categoría y es aplicable a una amplia variedad de materiales compatibles, tales como polímeros, cerámicas y metales (Frazier, 2014). Los modelos se generan mediante tecnologías de Diseño Asistido por Computador (CAD), modelado orgánico o ingeniería inversa, y se convierten a Lenguaje Estándar de Teselación (STL) mediante la aplicación de una malla triangular, cuya densidad determina la resolución y los tiempos de procesado (Stroud y Xirouchakis, 2000). Posteriormente, se segmentan en las capas a depositar a través de un software de laminado, en el cual también se configuran los parámetros del proceso de fabricación (Rasiya et al., 2021).

A principios de los años 80, Carl Deckard desarrolló y patentó la Sinterización Selectiva por Láser (SLS), sentando las bases del Prototipado Rápido (RP) como la primera técnica de fabricación aditiva capa por capa (Deckard, 1988). Este proceso permitía imprimir objetos con diversos materiales, incluidos metales, y se utilizaba tanto para prototipos, como de cara a la producción final (Wohlers et al., 2016). Actualmente, las tecnologías AM superan a las tradicionales al permitir la producción directa de piezas con una amplia variedad de materiales, garantizando una alta precisión geométrica y propiedades físico-mecánicas óptimas (Pratheesh-Kumar et al., 2021). Su capacidad para fabricar geometrías complejas con gran exactitud los hace especialmente ventajosos en la producción de piezas personalizadas (S. Singh et al., 2022). Esto aumenta su versatilidad y las hace ideales para múltiples aplicaciones en ingeniería, fabricación, industria aeroespacial, automoción, joyería, acuñación de monedas, vajilla, arte y arquitectura (Touri et al., 2019). Sin embargo, estos procesos también deben hacer frente a ciertas barreras productivas como, por ejemplo, la fabricación en masa, la falta de isotropía y confianza estructural o la necesidad de estandarización y normativa específica (Gao et al., 2015).

Dentro de los procesos AM, la tecnología más empleada, debido a su carácter tanto industrial como doméstico, es el Modelado por Deposición Fundida (FDM) (Stansbury e Idacavage, 2016). En ella, una boquilla calefactada dirige el flujo de materia prima, en forma de filamento (completamente polimérico o cargado con partículas de material compuesto) sobre una base térmica

en el plano X-Y para conformar la pieza deseada (Shanmugam et al., 2024). En la fabricación con polímeros también destacan las tecnologías de fotopolimerización (VAT), basadas en la solidificación selectiva de resina líquida fotosensible capa por capa mediante exposición controlada a la luz (Zhang et al., 2021), empleando diversas tecnologías de curado, como la estereolitografía (SLA) o el procesamiento digital de luz pulsatorio (DLP) o continuo (CDLP) (Chekkaramkodi et al., 2024). Además, también se pueden encontrar otras técnicas que parten de partículas poliméricas en polvo para la construcción del modelo tridimensional, como son las tecnologías de fusión de cama caliente (PBF) para polímeros (sinterizado selectivo por láser (SLS), sinterizado selectivo por calor (SHS), etc.) (Dechet et al., 2021); o las tecnologías de "Material Jetting", como el Multi Jet Fusion (MJF), donde se emplean agentes líquidos inyectados con tinta para ajustar selectivamente la absorción del polvo y la energía necesaria para la fusión local (Khorasani et al., 2024).

Sin embargo, estos procesos cobran una mayor importancia en el campo de la fabricación con metales. La Fabricación Aditiva Metálica (MAM) aventaja a las técnicas más tradicionales como el mecanizado por arranque de material o el conformado por moldeo para volúmenes de producción bajos y medios, al mantener un coste unitario aproximadamente constante (Badoniya et al., 2024), (Zhou et al., 2024). Además, permite la producción de piezas con geometrías complejas que pueden ser optimizadas geométricamente, reduciendo su peso sin comprometer su resistencia y reduciendo la cantidad de materia prima necesaria para su obtención (Noman et al., 2025). Consecuentemente, y unido a su alta automatización, estas tecnologías minimizan el desperdicio de material y reducen el tiempo de proceso, rebajando sus costes, de manera que logran optimizar el uso de recursos y la eficiencia de la fabricación (Pratheesh-Kumar et al., 2021).

La principal tecnología MAM es la fabricación por fusión en cama de polvo (PBF) para metales, que tiene un carácter más industrial que las relacionadas con la producción de piezas poliméricas, debido a la complejidad y coste de los dispositivos necesarios y sus materias primas (Ngo et al., 2018). Este proceso se fundamenta en la fusión selectiva de capas de material metálico en polvo mediante un haz de alta potencia gracias a la acción de un sistema láser o un haz de electrones (Taghizadeh y Zhu, 2024), siendo las principales técnicas que se pueden encontrar la fusión selectiva por láser (SLM) y la fusión por haz de electrones (EBM) (Moura y Monteiro, 2025). Otras tecnologías en este ámbito son los procesos de "Binder Jetting", donde se aplican selectivamente gotas de aglutinante para pegar las partículas metálicas que, posteriormente, pasan por varios tratamientos térmicos para reducir su porosidad (Ziaee y Crane, 2019), y la fabricación de objetos laminados (LOM), proceso basado en el corte y apilado de chapas metálicas, donde las láminas se segmentan según el diseño y se ensamblan mediante la tecnología de unión adecuada (adhesivo, soldadura ultrasónica, etc.) (Yi et al., 2004).

### 1.1. SISTEMAS DE DEPOSICIÓN DIRECTA DE ENERGÍA

Por último, dentro de las tecnologías MAM, los sistemas DED son procesos en constante evolución, que son ampliamente utilizados para el empleo de aleaciones metálicas con alta uniformidad, permitiendo la producción más rápida y eficiente de piezas con geometrías complejas en diversas escalas (Lalegani-Dezaki et al., 2022). Este método emplea energía térmica focalizada para fundir y depositar material de manera simultánea (Z. Liu et al., 2021). Tiene su base en los principios de recubrimiento ('cladding') y soldadura, utilizando diferentes fuentes de energía térmica (tecnología láser, haz de electrones o arcos de plasma) las cuales se aplican sobre la capa previamente depositada (Ahn, 2021). De forma simultánea, el material de aporte, en forma de alambre o polvo, se suministra en la zona de fusión, donde la combinación de la energía térmica y el material de aporte genera un baño de metal fundido (Dass y Moridi, 2019). A través de la

repetición de este procedimiento, se fabrica una pieza metálica tridimensional con alta precisión y control de propiedades (Z. Liu et al., 2021). Además, la tecnología DED presenta la posibilidad de generar una atmósfera protectora directamente sobre el baño de fusión mediante el uso de un gas inerte de protección (normalmente argón), lo que elimina la necesidad de tener una cámara completamente inerte, que reduce las limitaciones sobre las dimensiones de las piezas (Aversa et al., 2020).

La principal clasificación que se puede establecer entre las diferentes tecnologías DED está basada en el tipo de materia prima empleada, ya sean metales en polvo o filamentos metálicos (A. Singh et al., 2020). Ambos formatos permiten incrementar en gran medida la tasa de deposición de material, aumentando la velocidad de impresión y la productividad del sistema (Z. Li et al., 2022). Sin embargo, sistemas que emplean materia prima en polvo tienen mayor capacidad de resolución y de materializar geometrías complejas, así como un mejor acabado superficial y precisión dimensional (Piscopo, Atzeni et al., 2022). Por otro lado, los sistemas que parten de filamentos metálicos son más versátiles que los anteriores, permitiendo la fabricación de piezas de mayores dimensiones, con menor densidad residual y una mejor eficiencia energética (Menon et al., 2023). Además, los alambres metálicos disponibles comercialmente son más variados y presentan un menor coste en comparación con la materia prima en polvo, siendo más seguros y fácilmente almacenables, pero requieren una mayor potencia para el 'input' energético (Svetlizky, Zheng, Vyatskikh et al., 2022).

Además, los procesos DED se pueden clasificar también en función de la tecnología empleada para realizar el aporte energético durante el proceso, distinguiendo principalmente entre tecnologías láser, sistemas de haz de electrones y fusión por arco de plasma (Vafadar et al., 2021). Primeramente, los sistemas láser, como la tecnología LENS, pueden emplear tanto alambres metálicos como metales en polvo, a modo de materia prima, permitiendo la fabricación de piezas con metales puros o aleaciones, así como partículas cerámicas o materiales compuestos (Svetlizky, Zheng, Steinberg et al., 2022) (T. Das et al., 2023). Por otro lado, la fusión mediante haz de electrones se lleva a cabo en una cámara de vacío y puede utilizar material en forma de polvo o alambre, permitiendo una deposición con un espesor de capa reducido y una alta tasa de deposición (M. Yao et al., 2024). Por último, los sistemas equipados con tecnologías de fusión por arco de plasma se emplean principalmente para la fabricación a partir de filamentos metálicos con atmósfera controlada de argón (Costello et al., 2023). En cuanto a las capacidades y principales características de cada uno de estos grupos de tecnologías, la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) ha elaborado una tabla comparativa donde se pueden observar los aspectos más destacables de cada una de las fuentes energéticas (Tabla 1.1).

Tabla 1.1: Comparación entre tecnologías DED según fuente de energía (ASTM-F3187-16, 2016) (siendo 4 la valoración más alta y 1 la más baja).

Fuente	Volumen constructivo	Resolución de detalles	Tasa de deposición	Eficiencia	Potencial contaminante
Láser	3	2	2	1	3
Haz electrones	4	1	3	4	4
Arco plasma	3	1	3	4	2

Las tecnologías DED son procesos caracterizados por altas tasas de enfriamiento y calentamiento, así como altos gradientes térmicos (Cao et al., 2024), lo que puede generar transformaciones de fase complejas, tensiones residuales, distorsiones, porosidad y nucleación de grietas. Estos defectos afectan a la resistencia a la corrosión, el comportamiento mecánico y pueden provocar fallos prematuros en las piezas (Svetlizky, M. Das et al., 2021). Por un lado, la velocidad

de dichas tasas, los altos gradientes térmicos y los excesos o defectos en el aporte energético (Griffith et al., 1999) pueden originar defectos relacionados con la presencia de fases metálicas inesperadas (Zheng et al., 2008), tensiones residuales y distorsiones geométricas (Lu et al., 2019) o delaminaciones y grietas internas en las piezas (Alimardani et al., 2009). Muchos de ellos son críticos y fatales para la vida útil de las piezas que no pueden ser mitigados y deben prevenirse mediante la optimización del perfil de los parámetros del proceso, así como el precalentamiento del sistema (DebRoy et al., 2018). Sin embargo, aquellos defectos parcialmente reversibles, como las tensiones residuales, se pueden abordar mediante diversos procesos como los tratamientos térmicos por difracción de neutrones (comprobados con ensayos de compresión 'in situ') (Wang et al., 2018), los procesos de Acabado Asistido por Campo Magnético (MAF) (para tensiones entre 200 MPa y -70 MPa) que convierten la tensión de tracción en compresión en la superficie de la pieza (Yamaguchi et al., 2017) o el Granallado de Choque por Láser (LSP) (Guo et al., 2018).

Por otro lado, uno de los defectos más comunes presentes en piezas fabricadas mediante tecnología DED, ya sea partiendo de materia prima en forma de polvo o de filamentos metálicos, es la porosidad (Herzog et al., 2016). Se distinguen tres mecanismos principales para la formación de estos defectos: los "keyholes" que son orificios causados por fenómenos de vaporización localizada, debidos a una alta densidad energética, que provocan atrapamientos de gas (Svetlizky, Zheng, Buta et al., 2020); la porosidad gaseosa, determinada por las características de la materia prima, causada por la vaporización localizada de alguno de los elementos de la aleación del material de aporte o por el atrapamiento de burbujas de gas de protección inerte en el baño de material fundido (Eliaz et al., 2020); y la porosidad por falta de fusión, causada por la penetración insuficiente del baño de fusión en el sustrato o en la capa previamente depositada (Susan et al., 2006).

En función del mecanismo que haya tenido lugar, los poros tendrán una morfología determinada. Así, los "keyholes" son poros grandes y alargados en la dirección de construcción, mientras que los poros gaseosos son pequeños y esféricos. Además, los poros por Falta de Fusión (LoF) son de gran tamaño y forma irregular, similares en escala al baño de fusión (Nursyifaulkhair et al., 2019). Estos defectos tienen influencia directa sobre las propiedades mecánicas de las piezas resultantes, afectando a su resistencia a la fatiga (Prabhu et al., 2015), su comportamiento anisotrópico (Kobryn y Semiatin, 2001) y su resistencia a la corrosión y a la oxidación (Hong et al., 2001). Por último, cabe diferenciar entre la porosidad inter-capas, localizada en la interfaz entre dos capas sucesivas (generalmente provocada por LoF), y la porosidad intra-capas, que tiene lugar en el interior de cada capa (F. H. Kim et al., 2018). Donde, la primera suele solventarse mediante la optimización de los parámetros del proceso con los que se lleva a cabo la impresión (Ahsan et al., 2011), mientras que las últimas suelen requerir tratamientos más complejos y costosos como los tratamientos de Presión Isostática en Caliente (HIP), que emplea altas temperaturas y presiones para eliminar dichos defectos (Qiu et al., 2013).

Por otro lado, en las piezas fabricadas mediante tecnologías DED, uno de los defectos más recurrentes es la imprecisión dimensional, caracterizada generalmente por un leve sobredimensionamiento global, un incremento en la rugosidad superficial y una resolución limitada en la reproducción de detalles finos (Piscopo, Salmi et al., 2024). Estas desviaciones son consecuencia de las elevadas tasas de deposición inherentes al proceso, así como de las particularidades del baño fundido y los parámetros operativos definidos para la fuente de energía responsable de la fusión del material (Stephan et al., 2024). Como resultado, es habitual que estas piezas requieran procesos de postratamiento, siendo el mecanizado una de las estrategias más empleadas para ajustar las dimensiones críticas y garantizar el cumplimiento de las tolerancias de diseño (ZainElabdeen et al., 2024). En este contexto, una de las ventajas más significativas de los sistemas DED es su integración en entornos de fabricación híbrida (Dilberoglu et al., 2017). Este enfoque

se define como la combinación de un proceso de fabricación aditiva con un proceso sustractivo en una misma operación, de manera que ambas tecnologías se complementan (Stavropoulos et al., 2021). La fabricación híbrida emplea la manufactura aditiva para construir un modelo tridimensional con una geometría aproximada a la deseada, optimizando tiempos y costes de producción. Posteriormente, la precisión dimensional y geométrica se perfecciona mediante mecanizado, asegurando que la pieza final cumpla con las tolerancias especificadas en el diseño (Hoffmann et al., 2024).

En cuanto a los parámetros de influencia, los procesos DED están regidos por múltiples aspectos que afectan la estabilidad del baño fundido, la microestructura y la geometría de las piezas (Omar y Plucknett, 2022). La interacción entre el láser y el alambre, determinada por su posición angular, velocidad de alimentación y distancia entre ambos, condiciona la absorción de energía y la estabilidad del proceso. Un ajuste inadecuado puede generar una transición a transferencia por goteo, afectando la uniformidad del cordón depositado (Noori Rahim Abadi et al., 2023). Las estrategias de deposición también impactan en la microestructura y propiedades mecánicas. Un mayor ángulo de rotación entre capas acelera el enfriamiento, refinando la microestructura y mejorando la resistencia del material. Además, trayectorias como la deposición en contorno ofrecen mejor acabado y menor porosidad (Saboori et al., 2020) (Ribeiro et al., 2020).

Por otro lado, el control de la solidificación depende de la potencia del láser, la velocidad de escaneo y la tasa de alimentación. Aumentar la potencia o reducir la velocidad de escaneo eleva la temperatura del baño fundido, promoviendo la formación de granos columnares, mientras que velocidades de alimentación bajas favorecen granos equiaxiales, reduciendo defectos internos (X. Yao et al., 2020). Para mantener la precisión dimensional, es clave controlar la fluencia energética. Ajustar la velocidad de escaneo en lugar de reducir la potencia del láser permite una geometría uniforme sin afectar la productividad (G. Li et al., 2021). La irradiancia del láser también debe regularse, ya que valores altos provocan acumulación de calor y defectos, mientras que una irradiancia moderada mejora la estabilidad térmica, favoreciendo una solidificación homogénea (Froend et al., 2019). Por último, la altura de capa influye en la precisión y uniformidad mecánica. Un espesor excesivo puede causar falta de fusión y defectos en la microestructura, por lo que un control adecuado permite equilibrar productividad y calidad (Shim et al., 2016).

Uno de los aspectos más novedosos dentro de la fabricación aditiva con metales son los procesos multimaterial. La fabricación aditiva de múltiples materiales (MMAM) permite optimizar el desempeño de los componentes impresos en 3D mediante la integración de materiales diversos o la variación de la composición dentro de una misma pieza (García-Collado et al., 2022). Esta capacidad posibilita el incremento de la funcionalidad y la complejidad estructural, abriendo oportunidades para el diseño de productos avanzados con propiedades mejoradas, alto grado de personalización y elevado valor añadido (Nazir et al., 2023). En el campo de la fabricación aditiva mediante tecnologías DED, los avances relativos a este aspecto han llegado de la mano de los procesos que emplean polvos metálicos como materia prima. Este proceso se basa en la mezcla 'in situ' de polvos mediante inyección por soplado. Los polvos, transportados por un gas portador, se combinan en una cámara de mezcla, donde su composición se regula ajustando las tasas de alimentación. Luego, la mezcla homogeneizada se inyecta en la zona de procesamiento, donde el haz láser la precalienta antes de su incorporación en el baño de fusión (Muller et al., 2023).

No obstante, la literatura científica aún no ha abordado completamente el desarrollo de procesos MMAM mediante tecnologías DED a partir de filamentos metálicos. Por ello, uno de los objetivos principales de este proyecto será, tras una caracterización inicial del sistema de impresión y sus capacidades, establecer un perfil de parámetros y una metodología de proceso que viabilicen la fabricación multimaterial en estos sistemas. Esto incluirá la caracterización de los

materiales involucrados, la definición de un perfil operativo que optimice las propiedades en las interfases entre materiales y la selección de una estrategia de fabricación que garantice piezas con propiedades mecánicas homogéneas y mejoradas. Una buena opción para abordar este último aspecto sería la aplicación de estructuras de tipo 'voxel' mediante procesos multicabezal. Estas estructuras permiten la generación de componentes con propiedades localmente programables a través de la deposición controlada de múltiples materiales (Bader et al., 2018). Si bien los sistemas de impresión voxelada han sido ampliamente explorados en tecnologías basadas en resinas y materiales poliméricos (Skylar-Scott et al., 2019), su adaptación a procesos DED a partir de filamentos metálicos representa un desafío y una oportunidad para la fabricación de piezas de gran escala. En este enfoque, los voxeles generados serían significativamente más grandes que los obtenidos en otras tecnologías de impresión, lo que permitiría la fabricación de estructuras con gradientes de propiedades mecánicas y térmicas a una escala industrial.

### 1.2. MARCO DEL PROYECTO

Este proyecto surge con el objetivo de poner a punto una tecnología que previamente no existía dentro del Laboratorio de Fabricación y cuya implantación nace enmarcada en un proyecto del Plan Nacional que pretende la fabricación de prótesis multimaterial producidas con metales biodegradables de las familias de aleaciones del zinc y del magnesio. Una de las principales ventajas de este tipo de productos es que, además de cumplir una función estructural sustituyendo temporalmente las funciones realizadas por la estructura ósea dañada (implante de regeneración ósea), a medida que el hueso se recupera y teniendo este un diseño estructural y porosidad adecuados, permite su revascularización, mientras que el metal empleado en la prótesis se va degradando y bioabsorbiendo, de forma que el tejido nuevo reemplace al implante y no sea necesaria una segunda cirugía.

Este tipo de implantes todavía no existen a nivel clínico. Sin embargo, sí se han encontrado casos de funcionamiento similares a nivel de tornillería quirúrgica. En el caso de que se llegue a producir una fractura grande, debido a la dificultad del propio hueso de producir una revascularización del tejido, se suelen emplear tornillos de titanio que permanecen en el interior del cuerpo hasta que la fractura sana, siendo necesaria una segunda cirugía para su extracción, reduciendo así el nivel de discomfort del paciente. Reemplazando dichos tornillos por otros fabricados en magnesio, estos se terminarán reabsorbiendo y no será necesario un segundo procedimiento quirúrgico. Esta tecnología es viable a nivel clínico y, pese a no estar muy extendida, ya existe un producto comercial bajo este concepto.

Sin embargo, en el caso de que se produzca un defecto crítico, considerado como aquellas roturas de más de 3 milímetros, las medidas tradicionales no son suficientes debido a la incapacidad del tejido para revascularizarse, de manera que la única opción viable reside en los implantes. Empleando una estructura metálica porosa en forma de andamio alojada en el espacio generado por la fractura, cuya geometría facilite la colonización y diferenciación de células, se permitiría la revascularización del tejido, de manera que los alimentos, el oxígeno y el CO<sub>2</sub> lleguen para iniciar la fusión completa de la fisura. Sin embargo, en este proceso es crítico el control sobre la velocidad y las trayectorias de degradación, de manera que esta se inicie en las zonas más cercanas al hueso y finalice en aquellas más alejadas. Es en este punto donde se fortalece el empleo de procesos de fabricación multimaterial, con el objetivo de optimizar el control sobre dichas situaciones.

Por ejemplo, las aleaciones de magnesio se pueden degradar a una velocidad de entre 1 y 2 milímetros por año, mientras que las principales aleaciones de zinc se pueden degradar bajo una tasa de entre aproximadamente 0.1 y 0.2 milímetros por año. Esta diferencia de aproximadamente

10 veces mayor velocidad de degradación es la que posibilitaría el control diferenciado entre las diferentes zonas del implante. Por lo tanto, de entre todas las tecnologías de fabricación aditiva que permiten procesos multimaterial, se ha optado por los sistemas de tipo DED, que destacan entre sus competidores gracias a su facilidad de implantación y de control sobre el proceso a realizar, obteniendo en todo momento una microestructura controlada gracias a su similitud con los procesos de soldadura; siempre teniendo en cuenta sus limitaciones, como su baja precisión geométrica. Sin embargo, el primer paso para poder llevar a cabo estos procesos relacionados con aplicaciones biocompatibles es la caracterización del sistema de fabricación a emplear, así como de los propios filamentos certificados por el fabricante y las capacidades del sistema en lo referente a operaciones de tipo multimaterial.

## 2. ANTECEDENTES

La fabricación aditiva mediante DED constituye una de las tecnologías más prometedoras dentro de la manufactura avanzada, ya que permite la construcción capa a capa de componentes metálicos de geometría compleja y elevado valor añadido. Su relevancia radica en la posibilidad de fabricar piezas imposibles de obtener por métodos tradicionales y en su aplicación en sectores estratégicos como la aeronáutica, la automoción o la energía. No obstante, la transferencia de esta tecnología al ámbito industrial depende en gran medida de una adecuada caracterización del proceso y de la comprensión de sus efectos sobre la calidad de las piezas.

Diversos estudios han demostrado que los parámetros de operación del sistema DED, como la potencia del láser, la velocidad de escaneado o el caudal de material, tienen una influencia directa en la microestructura y en las propiedades mecánicas resultantes. En el caso de aceros inoxidables 316L, se ha observado que combinaciones de baja potencia y altas velocidades permiten reducir defectos como la porosidad o la aparición de grietas, mejorando al mismo tiempo la dureza y el módulo elástico de las piezas (Barragan et al., 2021). Por otro lado, otros estudios también arrojan que la compleja historia térmica asociada al proceso genera anisotropías y heterogeneidades microestructurales que aún plantean desafíos para el control de las propiedades finales (J. S. Kim et al., 2019).

En paralelo, la fabricación multimaterial mediante DED ha abierto nuevas oportunidades al permitir la creación de componentes con gradientes funcionales. Gracias al empleo de sistemas de alimentación múltiple, es posible combinar en una misma pieza materiales con propiedades contrastantes, como resistencia mecánica y alta conductividad térmica. Investigaciones recientes han mostrado la viabilidad de generar transiciones graduales entre aleaciones como Inconel 718 y CuCrZr, obteniendo estructuras que integran distintas funcionalidades en un solo componente (Javidrad y Koc, 2025). A pesar de estos avances, persisten retos técnicos en la planificación de trayectorias, en la estabilidad del flujo de polvos y en la precisión de la composición final.

Finalmente, la fabricación híbrida, que integra procesos aditivos como el DED con técnicas sustractivas de mecanizado, ha surgido como una solución para mejorar la precisión geométrica y el acabado superficial de las piezas. Esta estrategia permite producir preformas complejas mediante deposición y, posteriormente, ajustarlas dimensionalmente mediante operaciones de corte. Estudios recientes sobre la maquinabilidad de aceros y superaleaciones fabricados por DED han puesto de manifiesto que la microestructura particular generada por este proceso exige revisar los parámetros de mecanizado respecto a los empleados en materiales forjados, lo que refuerza la necesidad de investigación en este ámbito (Stavropoulos et al., 2021).

En conjunto, los antecedentes evidencian que la caracterización del proceso, el análisis microestructural, la viabilidad de la fabricación multimaterial y la integración en entornos híbridos constituyen aspectos fundamentales para avanzar en la consolidación industrial del DED. Es en este marco donde se sitúa el presente trabajo, cuyo propósito es contribuir al conocimiento y optimización de estas tecnologías, ofreciendo soluciones que permitan mejorar la calidad, la eficiencia y la aplicabilidad de la fabricación aditiva avanzada.

### 3. OBJETIVOS

El estudio realizado en este proyecto se basa en la caracterización básica y el desarrollo de los procesos de fabricación aditiva empleando sistemas DED láser alimentados con filamento metálico, en operaciones con una sola materia prima o de carácter multimaterial. A partir de este procedimiento se busca analizar las propiedades de los perfiles preconfigurados por el fabricante del sistema, así como sus capacidades técnicas básicas, además de obtener un perfil optimizado para la fabricación de piezas multimaterial, el análisis del comportamiento microestructural de los diferentes materiales empleados durante el proceso y el estudio de la viabilidad de estos sistemas para la obtención de piezas de carácter industrial mediante la introducción de estrategias de fabricación híbridas.

Para obtener la información necesaria para los análisis anteriores, se fabricarán diferentes probetas normalizadas para estudiar las capacidades básicas del sistema, así como otras probetas de carácter monomaterial y multimaterial que se analizarán posteriormente mediante equipos de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Consecuentemente, se obtendrán las imágenes necesarias para estudiar las propiedades de cada una de ellas y el comportamiento de la evolución microestructural a lo largo de las interfases en el caso de las piezas fabricadas empleando varios filamentos metálicos. Por último, se fabricará una preforma de una pieza de tipo industrial que, gracias a la aplicación de operaciones de mecanizado posterior, permitirá analizar la viabilidad de la tecnología DED en su integración en sistemas híbridos más completos y eficaces. Estos resultados permitirán extraer conclusiones sobre sus capacidades y sobre las propiedades finales de las piezas obtenidas.

Por lo tanto, este proyecto se fundamenta en dos hipótesis de investigación principales:

1. Las piezas resultantes de estos procesos de fabricación, de carácter mono y multimaterial, presentan buena precisión dimensional y propiedades mecánicas, tanto a nivel microestructural como a escala macroscópica.
2. Los sistemas de fabricación híbridos que combinan operaciones de fabricación aditiva mediante sistemas DED junto con tareas posteriores de mecanizado, tienen viabilidad técnica y económica en el sector.

El objetivo central es validar las hipótesis de investigación formuladas, para lo cual se establecen una serie de objetivos funcionales (OF):

- OF1: Caracterización técnica básica del sistema de fabricación y de los perfiles de proceso preconfigurados por el fabricante del equipo.
- OF2: Elaboración y optimización de un perfil de parámetros que minimice la porosidad en las interfases de las piezas multimaterial. Estudio del comportamiento microestructural del material depositado.
- OF3: Estudio de la viabilidad de un sistema fabricación híbrido para la obtención de piezas industriales de forma precisa y eficiente.

En base a lo expuesto en el apartado anterior, se definen las siguientes tareas (T) a ejecutar:

**T1: Caracterización de las capacidades técnicas del sistema mediante las probetas contempladas en la norma ISO 52902:2023.** Se fabricarán una serie de artefactos cuyo

diseño y geometría se contemplan en la normativa ISO mencionada anteriormente. Estas probetas permiten la caracterización básica de la precisión dimensional y geométrica del sistema de fabricación empleado, así como el acabado superficial alcanzado sobre sus superficies. Además, también describe la forma en la que se debe realizar el proceso de medida.

**T2: Caracterización de las propiedades finales de porosidad interna residual en probetas monomaterial fabricadas con perfiles preconfigurados por el fabricante.** Se estudiará la porosidad interna residual en probetas fabricadas con un único material y empleando los distintos perfiles de parámetros preconfigurados. Este análisis se realizará mediante imágenes obtenidas por un microscopio óptico, lo que permitirá obtener información sobre las propiedades mecánicas resultantes en las piezas fabricadas con cada configuración material-perfil.

**T3: Creación y optimización de un perfil de parámetros de proceso para minimizar la porosidad en las interfases de probetas multimaterial de tipo voxel.** Se llevará a cabo un proceso iterativo mediante el cual se optimizará el valor de una serie de parámetros influyentes en la porosidad en las interfases de una probeta multimaterial. Este análisis experimental se llevará a cabo mediante un sistema de microscopía óptica, lo que permitirá extraer conclusiones sobre el alcance de cada una de las modificaciones realizadas sobre el perfil de proceso.

**T4: Estudio del comportamiento metalúrgico del proceso de impresión multimaterial basado en la observación microestructural de diferentes regiones de interés mediante tecnología SEM.** Mediante un equipo de microscopía por barrido de electrones, se estudiará la evolución en el comportamiento de cada uno de los metales empleados durante el proceso de impresión de una probeta multimaterial de tipo voxel, tanto en las zonas donde la deposición ha tenido lugar de forma estable, como en aquellas relacionadas con el cambio de un material a otro en la interfase. Además, se buscará explicar cómo tiene lugar la interacción entre ambos materiales en dichas interfases.

**T5: Análisis de la viabilidad técnica y económica del empleo de sistemas de fabricación híbridos para la obtención de piezas de carácter industrial.** Se fabricará una preforma de una pieza de tipo industrial común (mangueta) con una geometría muy próxima a la geometría final de la pieza, para combinarla con tareas de mecanizado por arranque de material posteriores, consiguiendo un producto obtenido mediante un sistema de fabricación híbrido con alta precisión dimensional y geométrica. Además, se llevará a cabo una evaluación básica para estudiar su viabilidad técnica y económica, en comparación con sistemas más tradicionales.

## 4. FUNDAMENTO TEÓRICO

Este proyecto se ha desarrollado desde una perspectiva práctica, con el objetivo de poder sacar conclusiones y obtener resultados sobre las capacidades técnicas y productivas de los sistemas de impresión 3D que aplican tecnologías de tipo DED. Sin embargo, también han de considerarse ciertos aspectos teóricos que han sido empleados para el desarrollo experimental del proyecto. En este capítulo, se exponen los principales fundamentos teóricos sobre los procesos de fabricación aditiva asociados a las tecnologías DED, así como las expresiones matemáticas que gobiernan dichos procesos y que han sido tenidas en cuenta para su ajuste.

### 4.1. DENSIDAD DE ENERGÍA DEL PROCESO

Como se mencionó anteriormente, los resultados que se pueden observar sobre las piezas fabricadas mediante este tipo de tecnologías dependen de factores y parámetros muy diversos. Una de las propiedades más críticas para la resistencia y propiedades mecánicas finales de dichos productos es la porosidad residual. Dentro de los parámetros que influyen sobre esta, la densidad de energía portada por el láser destaca como uno de los factores con más peso. La densidad de energía ( $J/mm^3$ ) es un parámetro que relaciona el volumen de materia prima depositada con un 'input' energético determinado, que suele tender a mantenerse constante durante toda la operación de impresión, en función del tipo de geometría y/o material con el que se esté trabajando.

La forma en la que cada sistema interpreta este parámetro es diferente, siendo todas ellas válidas siempre y cuando se relacionen las dos magnitudes anteriormente mencionadas. En el caso del sistema Meltio (empleado para el desarrollo del proyecto), el volumen de material depositado depende directamente de tres parámetros del proceso de impresión: la altura de capa, el ancho de la línea depositada y la velocidad de impresión (entendida como la velocidad de movimiento del cabezal y, por tanto, del haz láser). Los dos primeros permiten obtener la sección de material depositado por el sistema en las trayectorias correspondientes al material y la geometría que se esté materializando en cada momento. Por otro lado, la velocidad de impresión permite extrapolar la sección calculada anteriormente al movimiento completo del cabezal, a la vez que permite obtener datos sobre la potencia suministrada por el láser en forma de energía, al introducir una componente temporal en el proceso. De esta forma, según la documentación técnica del sistema estudiado (Meltio, s.f.), la densidad de energía aplicada se podría obtener mediante la expresión de la Ecuación 4.1.

$$\text{Dens. Energía} \left( \frac{J}{mm^3} \right) = \frac{\text{Potencia del Láser (W)}}{\text{Alt. Capa (mm)} \times \text{Ancho Dep. (mm)} \times \left( \frac{\text{Velocidad (mm/min)}}{60} \right)} \quad (4.1)$$

Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, este parámetro no permanece constante durante toda la operación de impresión. Cada tipo de geometría a materializar (contornos externos e internos, rellenos, balsas, etc.) tiene unos requerimientos energéticos distintos en función de las dimensiones de las trayectorias depositadas, velocidad de impresión y aporte por parte del láser. Algo similar ocurre al comparar dos materiales de partida distintos, ya que su composición y sus propiedades mecánicas y térmicas pueden alterar sus requerimientos de cara al cálculo de la densidad de energía adecuada en la operación. Por lo tanto, para garantizar unos resultados óptimos, este parámetro debe comprobarse mediante la expresión anterior para cada una de las geometrías y materiales aplicados durante un proceso de impresión.

## 5. CAPÍTULO 1: CARACTERIZACIÓN BÁSICA

En este capítulo se pretende obtener las primeras conclusiones sobre las capacidades técnicas de los sistemas de impresión DED para la fabricación de piezas de tipo industrial y sus limitaciones, así como introducir los perfiles de parámetros de proceso normalizados por el fabricante del sistema y su influencia sobre las características de la operación, la densidad residual de las piezas resultantes y, por lo tanto, su microestructura. Para ello se realizaron varios ensayos sobre diferentes probetas experimentales, cuya geometría y parámetros de proceso aplicados permiten extraer la información necesaria para el estudio.

### 5.1. METODOLOGÍA

Este apartado tiene como objetivo describir los aspectos metodológicos que se aplicarán para la obtención de las conclusiones experimentales sobre las capacidades técnicas del sistema y los perfiles de proceso normalizados por el fabricante, así como su influencia en las propiedades mecánicas de las piezas resultantes. A continuación, la Figura 5.1 presenta la metodología experimental seguida para ello.

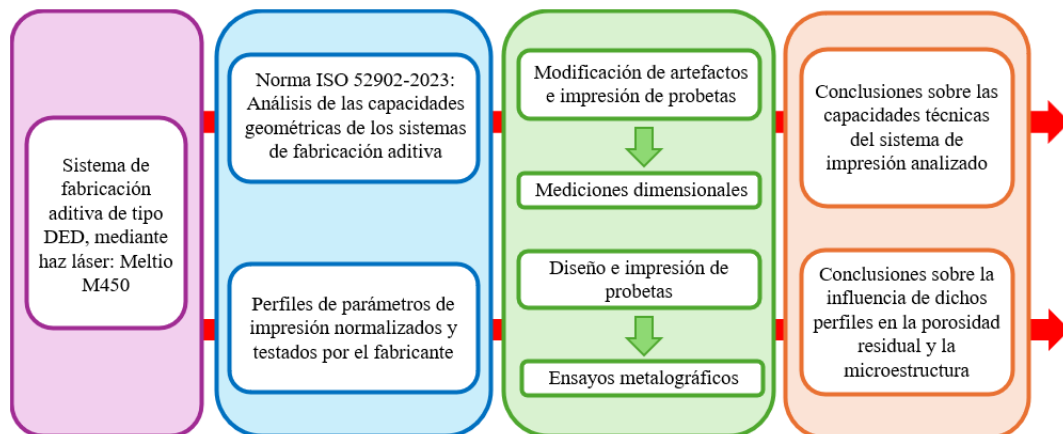


Figura 5.1: Diagrama sobre la metodología aplicada en el Capítulo 1 (Elaboración propia).

#### 5.1.1. EQUIPO DE IMPRESIÓN EMPLEADO

Para la realización de este proyecto se ha empleado un equipo de impresión de tipo DED del fabricante Meltio, modelo M450, que se muestra en la Figura 5.2. Este sistema permite la fabricación de piezas mediante la deposición láser de material metálico, posibilitando la realización de operaciones de impresión multimaterial al permitir una aplicación simultánea de dos materias primas consumibles distintas, elegibles de entre una gran variedad de materiales disponibles a nivel comercial. Así, el sistema es compatible con diversos metales, incluyendo principalmente aceros inoxidables (316L, 308L, 304L), aceros al carbono (SAE 4140, ER70S-6), aleaciones de titanio (Ti-6Al-4V) y aleaciones de níquel (Inconel 625, Inconel 718). Dichas materias primas se presentan en forma de filamentos de alambre metálico (sistema "wire-based"), siendo de un diámetro que puede variar entre los 0.8 y los 1.2 mm. Este formato proporciona una menor porosidad residual, así como un mayor control de proceso y requiere menos operaciones de postprocesado en comparación con los equipos que emplean polvo metálico (Meltio, 2024b).

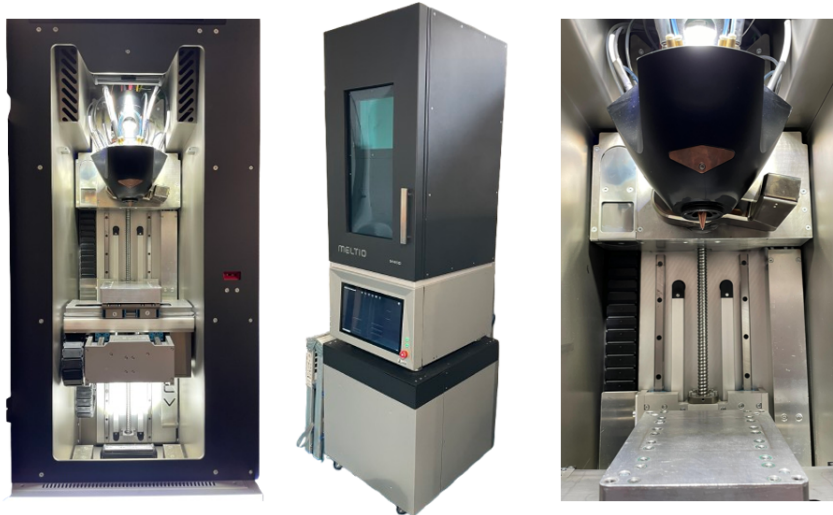


Figura 5.2: Equipo de impresión DED Meltio M450 (Elaboración propia).

Entre otras especificaciones, este equipo está dotado de un cabezal multi-láser que cuenta con 6 láseres de diodo de 200 W de potencia cada uno, mejorando la precisión y la capacidad de fusión del sistema. Además, permite la fabricación en una atmósfera controlada de argón (gas inerte), minimizando la formación de impurezas debidas a procesos continuos y rápidos de fusión y solidificación. Se trata de un sistema con un volumen constructivo de aproximadamente 150x170x425 mm, que lo hace ideal para la fabricación de piezas de tamaño mediano, pero con una esbeltez grande. Esta se puede realizar sobre plataformas de tamaño pequeño, mediano o grande, en función de las concentraciones térmicas que tendrán lugar durante la operación de impresión. Este equipo permite un control de proceso de gran precisión, basado en una modulación en lazo cerrado, con monitoreo y compensación en tiempo real para garantizar la calidad de las piezas. Por otro lado, en cuanto al sistema de refrigeración, este incluye un enfriador activo por agua, que mantiene la estabilidad térmica durante el proceso de impresión (Figura 5.3) (Meltio, 2024b).



Figura 5.3: Equipo de refrigeración líquida incluido (Elaboración propia).

En cuanto al software de laminación empleado para la planificación de las operaciones de impresión llevadas a cabo, se emplea el programa "Meltio Horizon" proporcionado por el fabricante del sistema. Se trata de un software desarrollado específicamente para la impresora Meltio M450. Su

principal ventaja es ofrecer una solución integrada que permite controlar con precisión parámetros clave del proceso de impresión, como la potencia del láser, el uso de doble hilo y el aporte añadido de corriente a través del propio filamento (perfil 'Utility HotWire'), entre muchos otros. Con una interfaz intuitiva y perfiles de impresión preconfigurados, facilita enormemente el uso de la tecnología. Este software incorpora funcionalidades avanzadas como la visualización 2D/3D de trayectorias o el cálculo automático de costes por pieza. Además, permite añadir modificadores de parámetros a lo largo de la geometría, lo que da al usuario un control detallado sobre la variación de condiciones de impresión en zonas específicas de la pieza. Esta flexibilidad, junto con la capacidad de crear y guardar perfiles personalizados, lo convierte en una herramienta potente para optimizar la calidad y la eficiencia en la fabricación de piezas metálicas mediante el sistema M450 (Meltio, 2024a).

### 5.1.2. ENSAYOS BAJO NORMA ISO 52902:2023

La norma ISO 52902:2023 describe la geometría de una serie de artefactos que se pueden utilizar para realizar una valoración, a partir de medidas cualitativas y cuantitativas sobre estas probetas, del comportamiento de una tecnología de fabricación aditiva. Cada uno de los artefactos especificados en dicho documento ha sido diseñado para evaluar e investigar el desempeño geométrico de la técnica estudiada en uno o varios aspectos en los que se puede desglosar la calidad de los resultados impresos (ISO-52902, 2023). A través de esta norma, la principal caracterización del alcance de una tecnología de carácter aditivo se lleva a cabo mediante la evaluación de parámetros de exactitud geométrica, acabado superficial y capacidad dimensional mínima. Este proceso se lleva a cabo para probar el alcance del sistema bajo un perfil de parámetros de funcionamiento y un material de alimentación de la impresora determinado. Por este motivo, es especialmente necesario que la fabricación de todos los artefactos se realice con la misma máquina y bajo las mismas condiciones externas al proceso de impresión. De esta forma, se conseguirá que los resultados extraídos estén lo menos influenciados posible por dichos factores ajenos a la producción de las piezas.

Por otro lado, este documento también especifica cómo se han de realizar las mediciones sobre los artefactos, una vez estos hayan sido impresos, cuyas especificaciones se tendrán en cuenta a la hora de realizar esta tarea. El principio básico a seguir en esta fase es que las medidas deben tomarse sobre cada probeta nada más su fabricación haya finalizado, esto garantizará que los resultados no se vean modificados por alteraciones posteriores al proceso de producción. Además, es necesario considerar que la norma recoge tres niveles de calidad en las que se pueden clasificar las tecnologías de fabricación aditiva, de forma que se debe distinguir en qué categoría se está trabajando, ya que la geometría y dimensiones de los artefactos variarán de una a otra. Tecnologías de fabricación más avanzadas y exactas, como el SLA o el SLS, ocupan los niveles de calidad fina y media. Por el contrario, a las técnicas de impresión menos desarrolladas y precisas, como el FDM, se les encasilla y deben evaluarse como proceso de calidad grosera (ISO-52902, 2023). Por lo tanto, como se puede considerar que los sistemas DED presentan una calidad inferior a estos últimos, será necesario llevar a cabo una serie de modificaciones sobre el diseño de los artefactos propios de los sistemas de calidad grosera, para que esta norma sea aplicable.

Estas modificaciones tendrán como objetivo adaptar la geometría de los artefactos a un valor aproximado que ha sido estimado como dimensión mínima materializable por el sistema. Por lo tanto, se han reescalado los artefactos de manera que la menor dimensión que debe materializar el sistema se corresponda con el diámetro de la boquilla empleada para la operación de impresión (en este caso: 1.1 milímetros). Además, se han tomado otras consideraciones como la separación de los artefactos múltiples más grandes en otros individuales y más pequeños, o la modificación de algunos artefactos, como el realizado para poder obtener información sobre el acabado superficial

del sistema, para facilitar su impresión. Cabe mencionar que estas modificaciones no están contempladas por la norma, pero al ser los sistemas de impresión DED por alambre metálico un aspecto novedoso en la industria, se ha estimado que estas modificaciones ayudarán a la aplicación de la normativa y permitirán extraer resultados válidos y fiables sobre las capacidades del sistema.

Esta norma distingue entre tres parámetros principales relacionados con la capacidad técnica y dimensional de un sistema de fabricación aditiva: precisión, resolución y acabado superficial. A continuación, se explican cada uno de estos parámetros y sus artefactos asociados determinados por la normativa (ISO-52902, 2023), mientras que la Figura 5.4 presenta los croquis de las mediciones a realizar sobre cada uno de ellos y la designación de dichas medidas:

- **Precisión:** cualidad del sistema que mide el grado de magnitud del error cometido durante el proceso de obtención de las piezas. Los artefactos que contempla la norma ISO 52902:2023 para valorar este parámetro geométrico de fabricación son los siguientes:
  - **Artefacto lineal (Código A):** evalúa la precisión en el posicionamiento lineal sobre una dirección de la máquina. En función de la orientación de la probeta (alineación con el eje X o con el eje Y), se podrán distinguir errores en las mediciones debidos a un fallo en el sistema de posicionamiento de la herramienta, permitiendo que se tengan los datos necesarios para realizar un reajuste sobre este.
  - **Artefacto para el eje Z (Código B):** pretende medir y evaluar la precisión en el posicionamiento de la herramienta en la dirección del eje Z. Se trata de un modelo similar a los mencionados anteriormente, pero que no requiere del empleo de estructuras de soporte para poder realizar dicha valoración en el tercer eje de la máquina. De esta forma, se podrían distinguir errores en las mediciones debidos a un fallo en el sistema de posicionamiento en el eje Z, permitiendo que se tengan los datos necesarios para recalibrar el sistema motriz.
- **Resolución:** cualidad del sistema que determina el grado de distinción que puede apreciarse entre dos piezas próximas en el espacio o en el tiempo. Los artefactos que contempla la norma ISO 52902:2023 para valorar este parámetro geométrico de fabricación son los siguientes:
  - **Resolución de pasadores (Código C):** realiza una evaluación sobre la capacidad del material empleado durante la fabricación para producir características finas en una pieza, mediante la impresión de geometrías que pueden estar presentes en piezas del sector industrial. El pasador más fino que la máquina es capaz de modelar informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden obtener mediante el empleo del sistema de fabricación aditiva que se está analizando. La medida sobre el diámetro de los pasadores también puede aportar información sobre la precisión del sistema.
  - **Resolución de agujeros (Código D):** valora cualitativamente la capacidad mínima de producción de características cilíndricas internas en una pieza mediante el empleo de la tecnología que se está analizando. El agujero con menor diámetro que la máquina es capaz de modelar informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden obtener mediante esta técnica. Además, la medida sobre el diámetro de los agujeros también puede aportar información sobre la precisión del sistema.
  - **Resolución de nervios (Código E):** da a conocer el valor mínimo de espesor de pared que se puede llegar a obtener aplicando este sistema de fabricación aditiva. El nervio más fino que la máquina es capaz de imprimir informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden obtener de esta manera, sobre todo de cara al modelado de

estructuras de paredes finas. La medida sobre el ancho de los nervios también puede aportar información sobre la precisión del sistema.

- Resolución de ranuras (Código F): muestra la capacidad del sistema en cuanto al valor mínimo de espesor de ranura que se puede llegar a conseguir en las piezas, o bien el valor mínimo de la separación entre dos características geométricas que se puede lograr mediante dicho sistema. La ranura más fina que la máquina es capaz de imprimir informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden obtener. La medida sobre el ancho de las ranuras también puede aportar información sobre la precisión del sistema.
- Acabado superficial: cualidad de un sistema que mide su capacidad para producir piezas de calidad respecto a los detalles finales de su fabricación, a nivel superficial. Como se ha mencionado anteriormente, se ha decidido modificar el diseño de este artefacto para facilitar su impresión. Por lo tanto, se decidió diseñar una pieza que permitiera obtener las mismas conclusiones que dicho artefacto, presentando una geometría mucho más sencilla y una menor dificultad en cuanto a las trayectorias de impresión necesarias y el material a emplear. De esta forma, sobre esta pieza se podrá medir, principalmente, el acabado superficial de una superficie en función de su inclinación, observando el efecto de los voladizos en una pieza fabricada con este material. Además de este condicionante, también se pueden considerar muchos otros como, por ejemplo, el diámetro de la boquilla extrusora empleada, la gravedad, la disipación de calor y el perfil de parámetros de funcionamiento que emplea la máquina durante el modelado. Todo ello provoca que la textura y el acabado de las piezas cambien a lo largo de su superficie. Además, cabe mencionar que la valoración del acabado superficial de este artefacto se realizará mediante una inspección visual y táctil de las superficies generadas por la impresora.

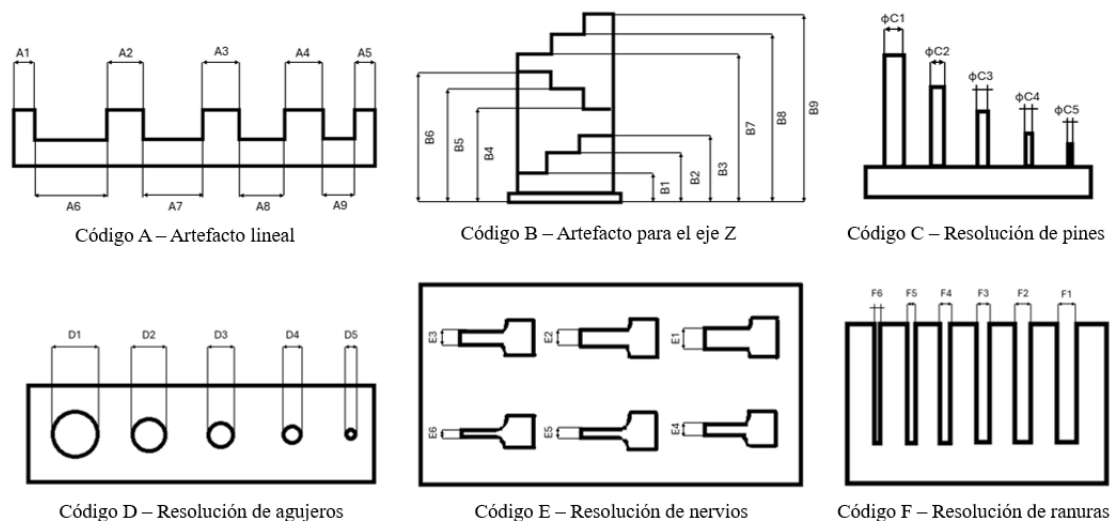


Figura 5.4: Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos propuestos por la norma ISO 52902:2023 (Elaboración propia).

En cuanto a la configuración de la operación de impresión, la materia prima en forma de filamento metálico a emplear será un hilo de acero inoxidable de 1 milímetro de diámetro que ha sido suministrado por el propio fabricante del sistema y que se detallará más adelante en este documento. Se ha elegido este material por sus bajos requerimientos energéticos y por su hipotética facilidad de impresión mediante sistemas DED. Por otro lado, con el objetivo de evitar concentraciones térmicas elevadas sobre la plataforma de impresión, se decidió dividir esta tarea

en varias operaciones de impresión, empleando para ello una plataforma de tamaño mediano (100x150mm) para cada una de ellas. Además, pese a que los perfiles de proceso normalizados del sistema se describirán en el siguiente apartado, cabe destacar que para estas operaciones se aplicará un perfil de tipo 'Utility' para acero inoxidable, de manera que se reducirán los tiempos de impresión, a cambio de cierta porosidad interna residual (que no es un factor crítico para la información que se pretende obtener). Por último, en cuanto a la metodología seguida para las mediciones de los artefactos, se tomarán tres medidas para cada dimensión antes de separar los artefactos de la plataforma de impresión, de manera que la media aritmética se aceptará como medida definitiva y se reducirá la influencia de factores externos.

### 5.1.3. ENSAYOS CON PERFILES DE PROCESO NORMALIZADOS

Antes de exponer los diferentes perfiles de proceso que el fabricante del sistema ha parametrizado y normalizado, es preciso explicar de dónde proceden. Como se mencionó anteriormente, el parámetro fundamental que actúa sobre la porosidad residual en las piezas es la densidad de energía aportada. La empresa desarrolladora, Meltio, ha llevado a cabo varios ensayos sobre probetas, fabricadas con filamentos de varios materiales (los suministrados por ellos) con las mismas dimensiones y bajo las mismas condiciones de proceso, a excepción de la densidad de energía aportada en cada caso (Meltio, s.f.). Tal y como se explicó, este parámetro no se puede modificar de forma directa, sino que depende de otros parámetros (altura de capa, ancho depositado, velocidad de impresión y potencia del láser), de forma que estos han sido los que se han ido modificando para las diferentes probetas fabricadas, calculando el valor de la densidad de energía correspondiente a cada caso. Como conclusión, se obtuvo que cada material presenta tres franjas energéticas propias, donde cada una de ellas implica distintas propiedades mecánicas en términos de porosidad interna. A continuación, se presentan cuáles son esas franjas para el filamento de acero inoxidable (a modo de ejemplo), así como las propiedades específicas de cada una de ellas:

- Banda 1: Falta de fusión (58 - 90 J/m<sup>3</sup>). Las piezas impresas dentro de este rango de densidades de energía pueden ser producidas a la mayor velocidad, aunque presentan defectos significativos, frecuentemente con grietas de varios milímetros de longitud causadas por falta de fusión. Se recomienda utilizar parámetros dentro de esta banda únicamente cuando no se requieran propiedades mecánicas críticas y se priorice la rapidez de fabricación. Es importante tener en cuenta que, debido al tamaño considerable de los defectos, estos serán visibles a simple vista tras el proceso de mecanizado.
- Banda 2: Defectos menores (90 - 122 J/m<sup>3</sup>). Las piezas impresas dentro de este rango generalmente no presentan defectos visibles a simple vista y exhiben un buen desempeño mecánico en periodos de corta duración. El tamaño de los defectos suele ser inferior a 250 micrómetros. Sin embargo, estos pueden afectar negativamente la vida útil a fatiga del componente.
- Banda 3: Pieza totalmente sólida (122 - 182 J/m<sup>3</sup>). Las piezas impresas en esta región no presentan defectos detectables mediante escaneo por Tomografía Computarizada (CT). A partir de este punto, las mediciones de densidad deben realizarse mediante técnicas metalográficas. Se observa que las piezas fabricadas en este rango alcanzan densidades superiores al 99.99%. No obstante, esto implica una reducción considerable en la velocidad de impresión.

Consecuentemente, estas tres franjas de densidad energética a las que el sistema puede trabajar se diferencian principalmente en la porosidad residual de las piezas, pero también en las tasas

de deposición que se pueden llegar a lograr en la operación. A medida que se incrementa la densidad energética aplicada, la porosidad residual se reduce hasta llegar a obtener piezas totalmente densas, conllevando también una reducción en cuanto a la tasa de deposición empleada, aumentando los tiempos de operación finales. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta cuál será la aplicación que tendrá cada una de las piezas que se quieran fabricar (mayor o menor responsabilidad estructural), con el objetivo de poder elegir la franja de trabajo que más se adecúe a ella y que haga que el sistema sea lo más eficiente posible. La Tabla 5.1 muestra las indicaciones del fabricante sobre las tasas de deposición alcanzables para cada una de estas franjas, aplicable para sus filamentos de acero inoxidable.

Tabla 5.1: Tasas de deposición alcanzables según fabricante (Meltio, s.f.).

<b>Franja Energética</b>	<b>Densidad de Energía [J/mm<sup>3</sup>]</b>	<b>Tasa de Deposición [g/h]</b>
Pieza Totalmente Sólida	122 - 182	174 - 259
Defectos Menores	90 - 122	259 - 352
Falta de Fusión	58 - 90	352 - 546

En función de las franjas energéticas descritas anteriormente y de sus efectos sobre las propiedades mecánicas de las piezas resultantes y los tiempos de operación, el fabricante del sistema ha creado y normalizado tres tipos de perfiles para cada uno de los filamentos que comercializa. Estos se diferencian principalmente en la densidad de energía aplicada sobre las trayectorias de deposición, es decir, en los parámetros que definen dicha magnitud. Cabe mencionar que, en función de las trayectorias y materiales que se empleen, cada perfil contemplará diferentes valores para dichos parámetros. A continuación, se exponen estos perfiles de proceso, sus franjas asociadas y el mecanismo de funcionamiento de cada uno de ellos (Meltio, s.f.).

- Perfil 'Verified Density': este perfil se corresponde con la franja de proceso para piezas totalmente sólidas. Se basa en reducir la velocidad de movimiento del cabezal, así como el ancho depositado de las trayectorias a materializar. Además, se ajusta la potencia aplicada de acuerdo al valor de densidad energética correspondiente.
- Perfil 'Utility': este se relaciona con la franja de operación del sistema que obtiene defectos menores en las piezas resultantes. Mediante un aumento de la velocidad de impresión y del ancho depositado se logra reducir los tiempos de proceso, al aumentar las tasas de deposición. Sin embargo, para que los valores de densidad energética no sean demasiado bajos, en algunas ocasiones se puede requerir un aumento de la potencia del láser (para materiales más exigentes a nivel térmico, como el titanio).
- Perfil 'Utility HotWire': este último perfil se emplea para piezas con baja responsabilidad estructural, ya que implica la posibilidad de aparición de defectos por falta de fusión en las piezas. Se diferencia del anterior, principalmente, en la aplicación de una intensidad de corriente sobre el filamento metálico que ayuda al sistema de haces láser a fundirlo. Este solo se puede implementar en las trayectorias correspondientes al relleno interno de las piezas e incrementa drásticamente las tasas de deposición.

Los ensayos que se realizarán aplicando estos perfiles de proceso tendrán como objetivo estudiar la influencia de las diferencias de porosidad residual sobre la microestructura de las piezas resultantes. Además, se podrá comprobar cómo se realizan las trayectorias de deposición con cada

uno de los perfiles. Esto resulta de gran interés de cara a comprender el comportamiento del sistema en impresiones donde el comportamiento mecánico de las piezas sea crítico, analizando las causas de posibles defectos que comprometan su funcionalidad. Para ello, se fabricarán probetas con forma de prisma cuadrangular, cuya geometría facilitará la aplicación de diversos ensayos metalográficos que permitan obtener dicha información.

En cuanto al material empleado para la fabricación de las probetas, se utilizarán los dos materiales que se aplicarán en el posterior estudio de probetas multimaterial, es decir, dos filamentos distintos: uno de acero inoxidable ("Stainless Steel 316L") y otro de acero blando ("Mild Steel ER70S-6") (ambos suministrados por el fabricante). Al igual que en los primeros ensayos, para evitar concentraciones térmicas excesivas en la base de trabajo del sistema, se ha decidido separar las probetas en varias operaciones de impresión, empleando una plataforma de impresión de tamaño medio. Por otro lado, debido a que el acero blando no dispone de un perfil 'Utility HotWire' propio, se ha decidido emplear únicamente los otros dos perfiles normalizados por el fabricante de cara a poder establecer una comparación entre ambos materiales. Los parámetros más característicos de estos perfiles ('Verified Density' y 'Utility') se exponen en la Tabla 5.2. Además, la Figura 5.5 muestra las probetas fabricadas bajo dichos perfiles.

Tabla 5.2: Parámetros de impresión principales para los perfiles preconfigurados por el fabricante.

Parámetros		Inoxidable "Verified D."	Inoxidable "Utility"	Blando "Verified D."	Blando "Utility"
Material Meltio		316LSi	316LSi	ER70S-6	ER70S-6
Altura capa (mm)		1.2	1.2	1.2	1.2
Contornos		2 a 1.5mm	2 a 1.5mm	2 a 1.5mm	2 a 1.5mm
Contorno Exterior	Velocidad (mm/s)	4	4	3	3
	Potencia láser (W)	600	600	700	700
	Corriente 'HotWire' (A)	2	2	2	2
	Voltaje 'HotWire' (V)	5000	5000	5000	5000
Contorno Interior	Velocidad (mm/s)	7.5	7.5	5	5
	Potencia láser (W)	1200	1200	1200	1200
	Corriente 'HotWire' (A)	2	2	2	2
	Voltaje 'HotWire' (V)	5000	5000	5000	5000
Relleno	Velocidad (mm/s)	12.5	7.5	7.5	5
	Potencia láser (W)	1200	1200	1200	1200
	Corriente 'HotWire' (A)	2	2	2	2
	Voltaje 'HotWire' (V)	5000	5000	5000	5000
	Densidad de relleno (%)	100	100	100	100

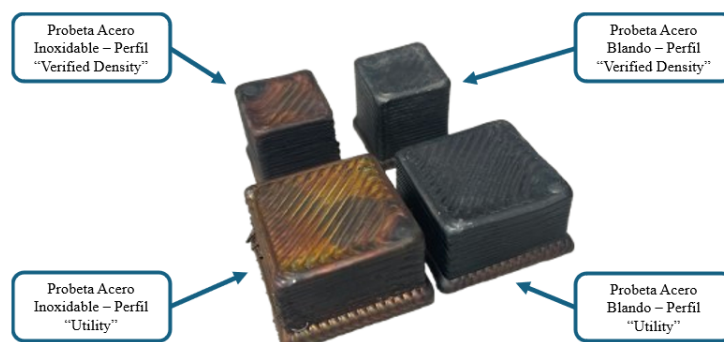


Figura 5.5: Probetas fabricadas en ambos materiales y con los perfiles preconfigurados por el fabricante (Elaboración propia).

Para poder extraer conclusiones sobre la influencia de estos perfiles sobre la microestructura de las probetas se ha optado por observar las probetas impresas al microscopio óptico, donde se puede realizar un estudio de su porosidad interna residual. Sin embargo, previo a que estos ensayos se puedan llevar a cabo, se requiere de la preparación de la superficie de observación de las probetas para garantizar la validez de los resultados. Con este objetivo, primeramente, empleando el equipo de corte de precisión de la Figura 5.6, se realizaron dos cortes de forma paralela en cada probeta para emplear las superficies generadas como superficie de observación y superficie de apoyo, respectivamente.

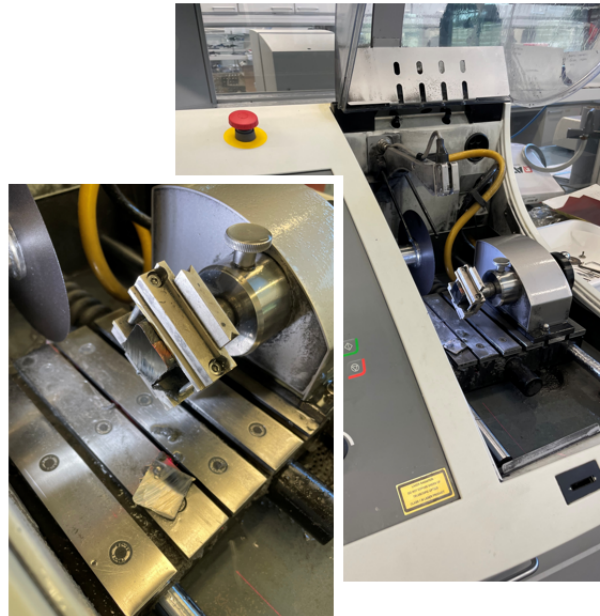


Figura 5.6: Equipo de corte de precisión empleado para la preparación de las probetas (Elaboración propia).

Seguidamente, se sometieron las probetas a dos operaciones de cara a mejorar la calidad de su superficie de observación. La primera de ellas, orientada al desbaste de estas, implicó el lijado de las superficies con varios planos que iban de menor a mayor granulometría (granos de 320, 600, 1200 y 2000 micrómetros). Seguidamente, la segunda operación, correspondiente al pulido de las superficies de observación, implicó el empleo de la pulidora manual de la Figura 5.7, así como varios paños de pulido donde se aplicaba una pequeña cantidad de pasta de diamante con granos que iban de mayor a menor tamaño de grano (6, 3 y 1 micrómetros). Entre las fases de pulido más finas, se sumergieron las probetas en un baño de ultrasonidos con el objetivo de eliminar cualquier tipo de residuo (granos de la pasta de diamante) que hubiera podido adherirse a la superficie de observación durante dicha operación. Una vez realizado lo anterior, las superficies de observación ya han sido preparadas para su visualización al microscopio óptico (Figura 5.8). Para esta parte del proceso experimental, el objetivo es realizar una imagen de tipo mapa a lo largo de las dos direcciones principales de cada probeta (dirección horizontal y vertical), de forma que se pueda observar la porosidad interna en dichas direcciones y se puedan relacionar los resultados obtenidos con las indicaciones dadas por el fabricante sobre los perfiles preconfigurados.



Figura 5.7: Equipo de pulido manual empleado para la preparación de las probetas (Elaboración propia).

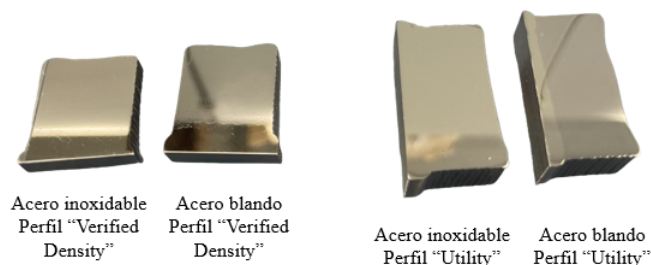


Figura 5.8: Resultado del proceso de preparación de las superficies de observación de las probetas fabricadas con los perfiles preconfigurados (Elaboración propia).

## 5.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras haber descrito la metodología de trabajo para realizar la caracterización inicial del sistema de impresión DED, este apartado tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos de dicho proceso experimental. Para ello, en la primera parte se presentarán los resultados de las mediciones y desviaciones dimensionales observadas en los artefactos de la norma ISO 52902:2023. Por otro lado, se expondrán las imágenes digitales obtenidas de los ensayos metalográficos aplicados sobre las probetas fabricadas con los perfiles de parámetros preconfigurados por el fabricante.

### 5.2.1. ENSAYOS BAJO NORMA ISO 52902:2023

Como se ha mencionado en apartados anteriores, se han fabricado todos los artefactos que se indican en la norma ISO 52902:2023, que permiten obtener información sobre las capacidades técnicas básicas de un sistema de fabricación. Tras las modificaciones geométricas y dimensionales correspondientes, la Figura 5.9 muestra los artefactos resultantes de las operaciones de impresión, según la codificación expuesta en la Figura 5.4.

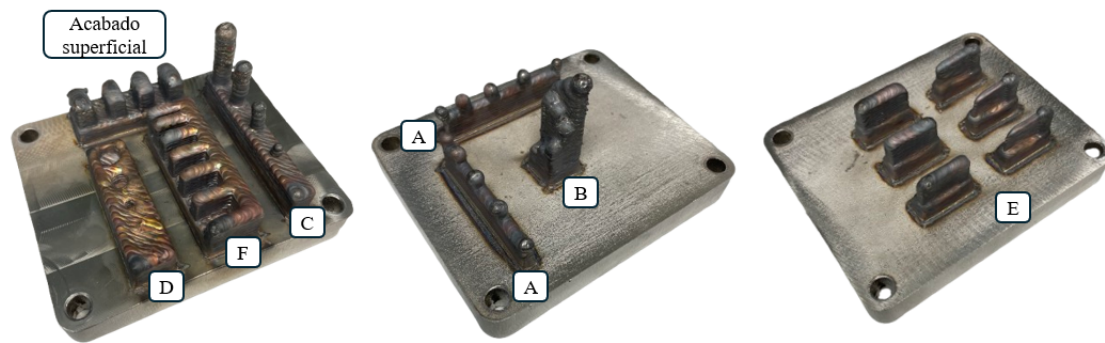


Figura 5.9: Artefactos de la norma ISO 52902:2023 impresos: artefacto lineal (A), artefacto para el eje Z (B), artefacto para la resolución de pasadores (C), artefacto para la resolución de agujeros (D), artefacto para la resolución de nervios (E), artefacto para la resolución de ranuras (F) y artefacto para el estudio del acabado superficial. (Elaboración propia).

En dicha figura, se puede ver cómo, en los artefactos lineales para la calibración del eje X e Y (A), las protuberancias de los extremos no han sido correctamente materializadas. En vez de tener una disposición vertical, se encuentran inclinadas hacia el exterior de la pieza, como si la estructura hubiese cedido al peso del material depositado. Además, en esta zona se puede observar cierta degradación del material debida a un prolongado mantenimiento de las altas temperaturas. Por otro lado, ninguna de las protuberancias se ha logrado materializar con esquinas a 90 grados, sino que presentan redondeos en todas sus aristas, llegando a verse una especie de esferas completamente redondeadas en lo más alto de dichas estructuras. Además, en el artefacto para la calibración del eje Z (B), se puede observar cómo los cuadrados que marcan cada uno de los pisos de la pieza no se han materializado de forma correcta, presentando redondeos y zonas esféricas. Por otro lado, debido a la esbeltez y gran altura de la pieza, comparada con las del resto de su tanda de impresión, la pieza presenta degradación en varias zonas debida a los efectos térmicos.

En cuanto a los artefactos relativos a la capacidad de resolución del sistema, en el artefacto para la resolución de pines (C), la sección no es constante a lo largo de la vertical, así como su eje. Esto es más notable en los más finos. Sin embargo, los más esbeltos presentan cierta degradación en el material debida a la concentración térmica en esa zona, posiblemente a causa de que no existe suficiente enfriamiento entre una capa y otra (este defecto es menor en la parte inferior, donde hay un mayor tiempo entre dos capas consecutivas de un mismo pin). Por otro lado, en el artefacto para la resolución de agujeros (D), en las zonas donde no se han materializado los agujeros (los más pequeños), se puede ver cómo las trayectorias del cabezal dejan de ser rectas; esto implica que el sistema ha intentado realizar las trayectorias, pero el sobreespesor de la impresión ha impedido su consecución.

Los diferentes artefactos para la resolución de nervios (E) han logrado materializarse de forma correcta, con paredes rectas y aproximadamente uniformes. Sin embargo, las columnas que dan soporte a estas paredes presentan redondeos en todas sus aristas. Además, las esquinas de los artefactos para la resolución de ranuras (F) que forman las paredes que se sitúan entre cada ranura no tienen esquinas a 90°, sino que han sido redondeadas; sin embargo, las internas sí son rectas. Por último, la modificación del artefacto para la consideración del acabado superficial del sistema muestra ciertas discordancias sobre las recomendaciones de diseño del fabricante. Este garantiza que el máximo voladizo alcanzable es de 20° con respecto a la vertical. Sin embargo, esta parte tampoco se ha podido materializar correctamente. Cabe mencionar que este artefacto ha sido fabricado con una altura de capa de 1 milímetro, por lo que una altura de capa menor que dicho valor podría permitir un mejor comportamiento del sistema en este aspecto.

En el Anexo I se adjuntan los resultados de las comprobaciones dimensionales realizadas según se explica en la normativa seguida y llevadas a cabo mediante un calibre con una resolución de 0.01mm. Estas se han aplicado sobre las medidas de todos los artefactos fabricados, así como la media aritmética de las tres medidas tomadas, que ha sido considerada como la medida final válida para cada dimensión. Esta información se encuentra condensada en los gráficos de la Figura 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15, donde se muestran las desviaciones dimensionales correspondientes para cada una de las medidas y artefactos fabricados.

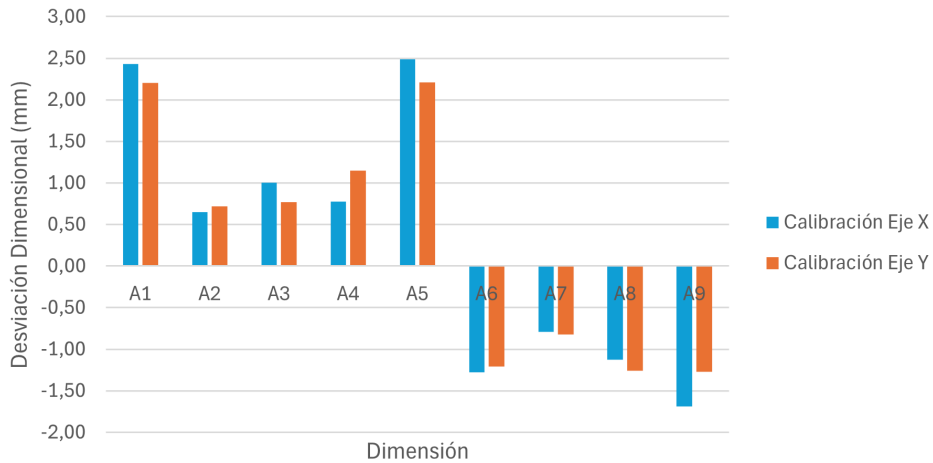


Figura 5.10: Desviaciones dimensionales sobre el artefacto lineal para la calibración del eje X e Y (Código A) (Elaboración propia).

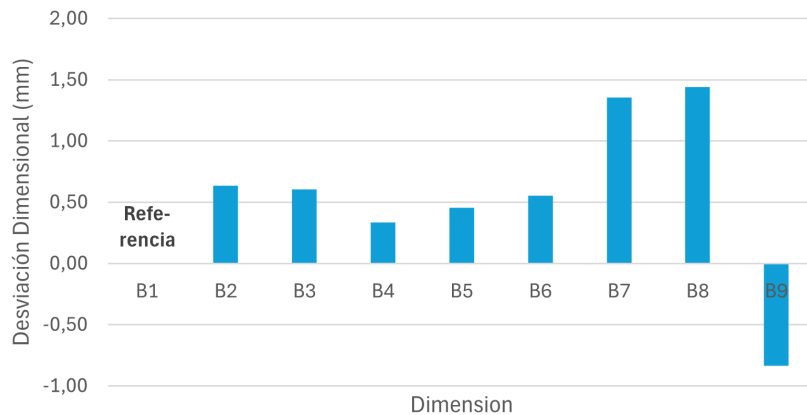


Figura 5.11: Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la calibración del eje Z (Código B) (Elaboración propia).

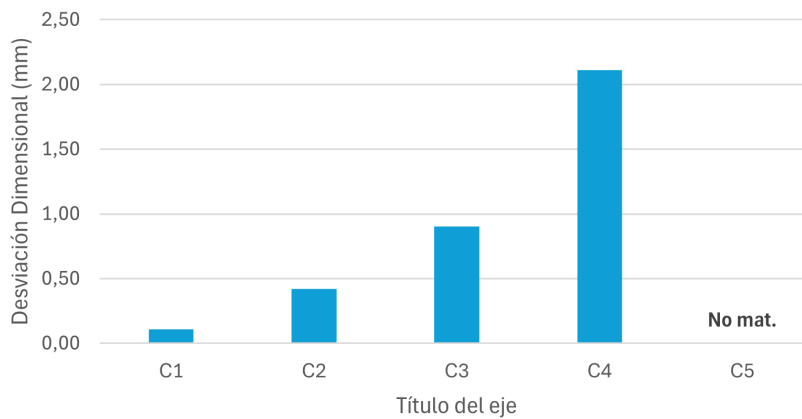


Figura 5.12: Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de pines (Código C) (Elaboración propia).

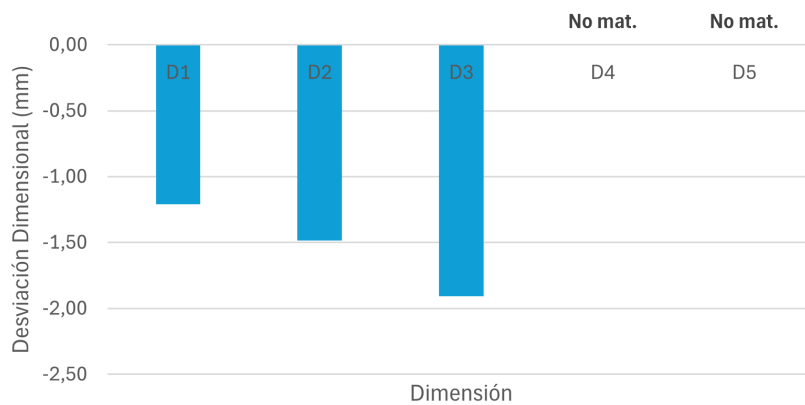


Figura 5.13: Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de agujeros (Código D) (Elaboración propia).

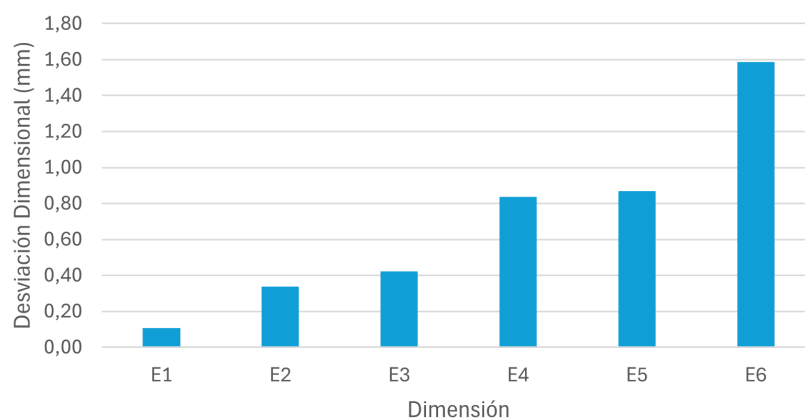


Figura 5.14: Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de nervios (Código E) (Elaboración propia).

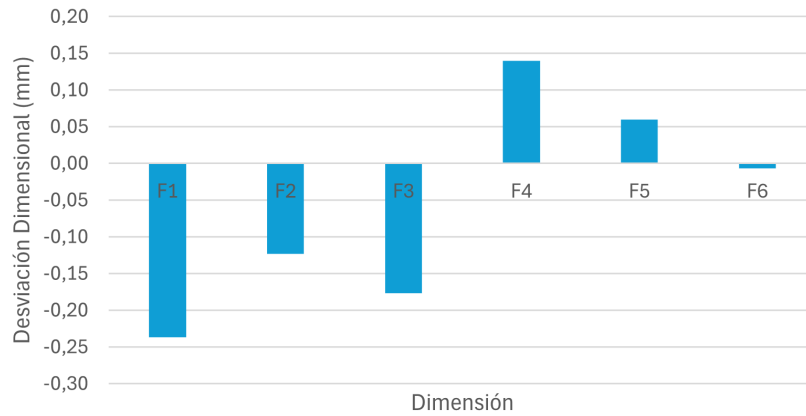


Figura 5.15: Desviaciones dimensionales sobre el artefacto para la resolución de ranuras (Código F) (Elaboración propia).

### 5.2.2. ENSAYOS CON PERFILES DE PROCESO NORMALIZADOS

Los mapas obtenidos sobre las superficies de observación de las probetas fabricadas para el estudio de su porosidad interna se exponen en el Anexo II de este documento. Estas imágenes, obtenidas mediante un microscopio óptico, se emplearán para realizar un análisis de la porosidad existente en dichas superficies mediante la utilización del software 'ImageJ'. Mediante herramientas de segmentación y análisis de partículas, este programa identifica y mide automáticamente cada poro, calculando parámetros como área, volumen, forma y distribución. Consecuentemente, permite obtener un porcentaje aproximado con el que poder cuantificar la porosidad interna observable en cada una de las probetas, con respecto a la superficie total estudiada, así como su caracterización en cuanto al tamaño medio aproximado de los poros detectados. Los resultados detallados del procesamiento llevado a cabo mediante este software se exponen también en el Anexo II de este documento, mientras que en la Tabla 5.3 se expone un resumen de los valores extraídos.

Tabla 5.3: Resumen de los resultados del análisis de la porosidad interna de las probetas fabricadas con perfiles preconfigurados.

Material	Perfil Imp.	% Porosidad Medio	Tamaño Medio (milímetros)
Ac. Inoxidable	'Utility'	0.893	0.0387
	'Verified Density'	0.807	0.0970
Ac. Blando	'Utility'	0.381	0.0236
	'Verified Density'	0.490	0.0482

Como se puede observar en la tabla superior, los porcentajes de porosidad media obtenidos no concuerdan en todos los casos con los resultados esperados. Mientras que, para el caso del acero inoxidable, la porosidad interna sí es menor en la probeta fabricada con un perfil de parámetros de tipo 'Verified Density', que aquella fabricada con un perfil de tipo 'Utility', en el caso de las probetas fabricadas con acero blando ocurre lo contrario. Esta diferencia se puede asociar a la diferencia que existe entre los requerimientos de potencia energética aportada por

el láser para cada uno de los filamentos estudiados, así como para cada uno de los perfiles de impresiones estudiados. En una probeta con una geometría de dimensiones reducidas, se dan mayores concentraciones térmicas debidas al empleo del filamento de acero blando como materia prima, así como a los mayores requerimientos de la aplicación de un perfil de parámetros de tipo 'Verified Density'. Esto hace que aumente la posibilidad de aparición de pequeñas inclusiones en el proceso de fusión del material, lo que se traduce en un aumento de la porosidad interna de la probeta estudiada.

Además, gracias a la documentación proporcionada por el fabricante (Meltio, 2024b), se puede establecer una comparación entre los valores obtenidos en el estudio de la porosidad interna de las probetas con el valor esperado que dicta el fabricante. Según sus estudios previos, se menciona que los perfiles de impresión 'Verified Density', para cualquiera de sus filamentos probados, garantizan un porcentaje de densidad de aproximadamente 99.99 %, lo que equivale a solamente un 0.01 % de porosidad interna. Como se puede observar, esto no se cumple en ninguna de las probetas analizadas con este tipo de perfil de impresión. Esta diferencia entre el valor de porosidad interna obtenido y el esperado se puede deber principalmente a la geometría y dimensiones de la probeta empleada para el análisis.

Los altos requerimientos térmicos de los perfiles de tipo 'Verified Density' aumentan en gran medida las concentraciones térmicas en la superficie de deposición de la probeta. Si esto se une a que las dimensiones de la probeta experimental son pequeñas (15x15x15mm), esto podría haber influido en el tiempo de enfriamiento y solidificación entre capas, afectando a la degradación del material ya depositado y favoreciendo la aparición de pequeñas impurezas en la interfase de las capas, aumentando el porcentaje de porosidad interna. Si esta hipótesis se contrasta con la documentación experimental aportada por el fabricante del sistema, se puede observar cómo para dicho procedimiento se ha empleado una probeta que, aproximadamente, triplica la dimensión principal de la pieza fabricada en este estudio. Esto es debido a que el fabricante optó por fabricar una pieza que luego dividiría en probetas individuales más pequeñas de cara al proceso experimental, evitando así este tipo de problemáticas. Además, atendiendo a las imágenes realizadas mediante microscopio óptico sobre dichas probetas, se puede observar una gran concentración de poros en la zona relativa a la intersección entre las trayectorias depositadas (Figura 5.16), que es el punto donde interactúan el material ya depositado con el metal fundido, en lo que se puede considerar como la zona afectada térmicamente para este proceso.



Figura 5.16: Sección de la superficie de observación de la probeta de acero blando fabricada con perfil de tipo 'Verified Density' (Elaboración propia).

### 5.3. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Según lo observado tras la fabricación y el análisis de los artefactos marcados por la norma ISO 52902:2023, una de las grandes conclusiones extraíbles es que este sistema de impresión presenta grandes desviaciones dimensionales y geométricas, así como deformaciones críticas para geometrías de pequeña dimensión, ya sean simples o más complejas. Por ejemplo, para las estructuras más pequeñas a materializar en dichos artefactos, se pueden observar redondeos,

fallos de precisión y alabeos críticos. Por otro lado, en relación a los resultados sobre la precisión dimensional y geométrica del sistema expuestos en los gráficos obtenidos, se puede ver cómo, a medida que el tamaño de la estructura a depositar aumenta, estas condiciones mejoran e incluso se ajustan mucho a los valores esperados para dichas dimensiones en las piezas más grandes.

Sin embargo, a medida que aumenta el tamaño de las piezas, es importante considerar su esbeltez. De esta forma, piezas grandes pero muy esbeltas, con geometrías pequeñas en la parte superior, presentarán zonas con deformaciones críticas y graves degradaciones del material depositado, debido a las grandes concentraciones de temperatura en dichas zonas. Esto pasa también si se da el caso de piezas que tengan una gran altura en comparación con el resto de piezas que se están imprimiendo en una misma operación, o en el caso de que se esté imprimiendo una sola pieza, pero con una sección reducida, donde estos defectos se producen debido a que no existe tiempo suficiente entre capa y capa a que se produzca el enfriamiento localizado necesario en dichas regiones.

Por último, se puede observar cómo, dimensionalmente, el sistema de impresión tiende a dejar un sobreespesor para cada una de las dimensiones materializadas, que es precisamente lo que se entiende que en estos sistemas se debe corregir, empleando un sistema de mecanizado por arranque de material para meter la pieza en tolerancias. Esta perspectiva nunca se puede olvidar a la hora de analizar este tipo de tecnologías de fabricación aditiva, que no presentan una gran precisión dimensional, pero sí dotan a las piezas de unas buenas propiedades mecánicas finales, volviendo al sistema de impresión más productivo y rentable.

En cuanto a los ensayos realizados para el estudio de los perfiles de impresión preconfigurados por el fabricante del sistema, se ha podido concluir que el tamaño de la pieza a fabricar influye en gran medida en el porcentaje de porosidad interna obtenido, debido a las concentraciones térmicas existentes y a la reducción del tiempo entre capas depositadas. Además, en referencia a la diferencia entre materiales y entre los propios perfiles, se ha observado cómo las piezas fabricadas en acero inoxidable parten de un porcentaje de porosidad interna mayor, con respecto a las piezas de acero blando, probablemente debido a la propia composición química del filamento. Además, en aquellos escenarios donde los requerimientos térmicos son mayores (perfiles de impresión de tipo 'Verified Density' y piezas de acero blando), si las dimensiones de la pieza a materializar son pequeñas, se puede producir la degradación de las capas previamente depositadas, favoreciendo la aparición de impurezas e inclusiones entre capas, lo que provoca un aumento de la porosidad interna.

Durante este proceso experimental se observaron ciertas limitaciones técnicas. Por un lado, el pequeño tamaño de los artefactos fabricados de la norma ISO 52902:2023, pese a las modificaciones dimensionales llevadas a cabo, imposibilitó la consideración de otras propiedades geométricas dentro del ensayo, como puede ser la precisión del sistema sobre la conicidad y el paralelismo de las superficies materializadas. Pese a que estas propiedades están consideradas en la normativa, las deformaciones experimentadas por los artefactos imposibilitaron la aplicación de métodos de inspección más avanzados (máquina de medir por coordenadas). Además, las dimensiones de las probetas experimentales del análisis de los perfiles de impresión preconfigurados también han influido sobre los resultados, favoreciendo el incremento de las concentraciones térmicas, así como el aumento de la porosidad interna de las probetas, por medio de la degradación de las capas intermedias.

Con el objetivo de mejorar la calidad de las conclusiones experimentales extraídas, podría emplearse un perfil de impresión con una altura de capa menor para asegurar una mayor precisión de los detalles más pequeños. También, se podría modificar el control de proceso del sistema para aumentar las pausas de espera entre capas, posibilitando el enfriamiento del material previamen-

te depositado. Además, si se realiza una modificación de las dimensiones de los artefactos según las recomendaciones de diseño del fabricante acerca de las características mínimas de las piezas que garantizan la ausencia de deformaciones críticas, podrían emplearse métodos de inspección dimensional y geométrica más avanzados, como las máquinas de medir por coordenadas, para caracterizar las capacidades técnicas del sistema. Por otro lado, para garantizar que los resultados extraídos son extrapolables al resto de los materiales compatibles con el sistema, se podrían repetir estos ensayos empleando otros filamentos metálicos para la fabricación de los artefactos. Por último, con el objetivo de aumentar la información extraída sobre los perfiles de impresión preconfigurados por el fabricante, se propone la repetición de los ensayos de porosidad interna con probetas de mayores dimensiones. Además, también se considera necesaria la caracterización de otros filamentos, así como la obtención de información sobre las capacidades del tercer perfil de parámetros de impresión disponible para cada uno de ellos ('Utility Hotwire').

## 6. CAPÍTULO 2: IMPRESIÓN MULTIMATERIAL

Uno de los grandes ámbitos que todavía está por desarrollarse completamente en el campo de la impresión 3D mediante sistemas DED de filamento metálico es la impresión multimaterial. Este capítulo tiene como objetivo profundizar en este tipo de procesos, estudiando la microestructura interna de las piezas fabricadas, así como la estructura microscópica, porosidad residual y propiedades mecánicas existentes en la interfase donde ambos materiales de impresión se encuentran en contacto. Las características de estas zonas son cruciales para el comportamiento mecánico de las piezas, ya que pueden suponer el inicio de defectos internos como grietas o inclusiones que empeoren la vida a fatiga del componente y aumenten el riesgo de sufrir una rotura crítica dentro de condiciones consideradas como seguras.

### 6.1. METODOLOGÍA

Este apartado tiene como objetivo describir los aspectos metodológicos que se aplicarán para la obtención de las conclusiones experimentales sobre los procesos de impresión mediante sistemas DED por deposición de hilo metálico, así como las propiedades mecánicas y posibles defectos a nivel microestructural en la interfase entre los materiales empleados. A continuación, la Figura 6.1 presenta la metodología experimental seguida para ello.

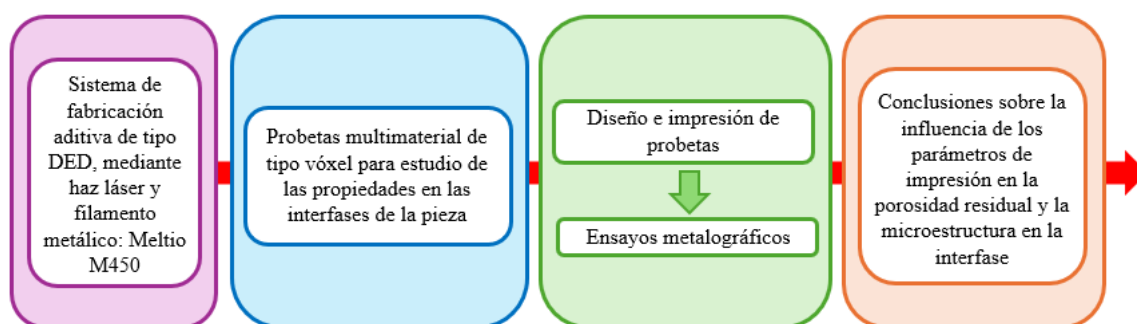


Figura 6.1: Diagrama sobre la metodología aplicada en el Capítulo 2 (Elaboración propia).

Para la realización de esta parte del estudio experimental se empleará el mismo equipo que el utilizado para la impresión de las probetas del Capítulo 1, descrito en el Apartado 5.1.1.. Por otro lado, las probetas diseñadas siguen una estructura de tipo vóxel, que es una de las más empleadas para la impresión de piezas metálicas en varios materiales. Estas se basan en la unión, de forma alterna, de varias estructuras cúbicas fabricadas con los distintos materiales que se emplearán a lo largo de la operación multimaterial. De esta forma, al existir una distribución homogénea de los cubos de cada metal, las propiedades mecánicas y otras características tienden a homogenizarse también a lo largo de todas las direcciones de la geometría materializada. Además, a medida que se reducen las dimensiones de dichos cubos, se consigue una mayor suavidad en cuanto a la transición entre las propiedades de un material a otro.

Sin embargo, estas estructuras, al igual que la mayor parte de las estrategias de impresión multimaterial existentes, presentan puntos críticos en la interfase entre ambos materiales. En ellas, se debe garantizar que la transición de un material a otro se realiza con la mayor suavidad y homogeneidad posible, para evitar la aparición de defectos que supongan un factor concentrador de tensiones, así como importantes defectos de porosidad interna. Por lo tanto, es de especial interés conocer qué parámetros de impresión influyen en este aspecto, así como cuál debería

ser su valor óptimo para minimizar la aparición de dichos defectos críticos y homogeneizar las propiedades mecánicas en la interfase entre diferentes materias primas.

Considerando lo descrito anteriormente, se ha decidido diseñar una probeta en forma de cubo, dividida en ocho estructuras cúbicas más pequeñas (vóxeles), dando lugar al 'cubo 2x2' multimaterial que se expone en la Figura 6.2. Como se puede observar, las dimensiones de los vóxeles son ligeramente superiores a las consideradas como estándar en otras tecnologías de impresión (del orden de unos pocos milímetros), debido a las limitaciones observadas sobre el equipo para la materialización de geometrías de pequeña dimensión (Capítulo 1). Esta geometría permite estudiar las propiedades de la interfase entre ambos materiales mediante la aplicación de ensayos metalográficos, tanto en la dirección horizontal como en la vertical. Por lo tanto, cubre todas las posibles direcciones de interacción entre los materiales empleados y permite considerar todos los efectos que puedan llegar a tener los parámetros de impresión en las propiedades mecánicas y porosidad residual de dichas zonas.

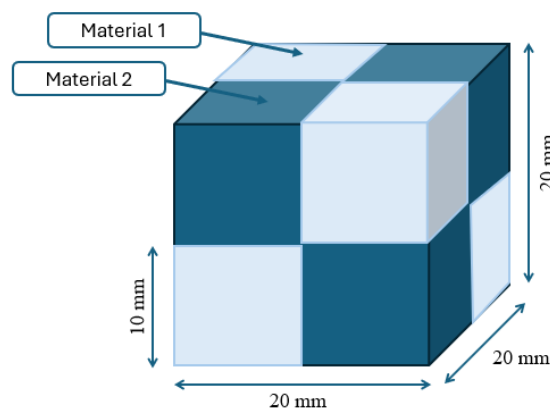


Figura 6.2: Diseño de probeta tipo vóxel para el estudio de las operaciones de impresión multimaterial (Elaboración propia).

En cuanto a los materiales empleados, se utilizarán los dos filamentos metálicos usados como materia prima para los ensayos metalográficos del capítulo previo, es decir, un filamento de acero inoxidable ("Stainless Steel 316L") y un acero blando ("Mild Steel ER70S-6"), suministrados por el fabricante del equipo de impresión. Así, la información extraída sobre estos materiales y sus parámetros de impresión puede unirse a la concluida en el capítulo anterior para tener una visión más profunda sobre el comportamiento de cada uno de ellos, al ser dos materiales muy comunes en el sector industrial. De esta forma, se iniciará un proceso iterativo de impresión de estas probetas donde, mediante la modificación de los parámetros de mayor influencia en el comportamiento objeto de estudio, se pretende llegar a una configuración de parámetros óptima para la impresión multimaterial de estructuras tipo vóxel.

Consecuentemente, se partirá desde el perfil de parámetros de tipo "Verified Density" de ambos materiales, que ha sido preconfigurado por el fabricante, con el objetivo de lograr minimizar la porosidad residual en el interior de las estructuras cúbicas más pequeñas, reduciendo su posible influencia en los resultados observables en la interfase entre ambos materiales. Cabe mencionar que este perfil de impresión es el que ha sido recomendado por el fabricante para la consecución de este tipo de impresiones multimaterial. Sin embargo, se ha optado por reducir el número de perímetros externos de 2 a 1, para adaptar el perfil a las dimensiones pequeñas de los vóxeles.

Además, se ha determinado que los parámetros de proceso de mayor influencia en este aspecto son fundamentalmente dos: la superposición entre los contornos depositados y la superposición

contorno-relleno (Ghadai et al., 2021)(Skylar-Scott et al., 2019). Por lo tanto, estos serán los parámetros que gobernarán el comportamiento de la impresión multimaterial en la interfase entre materiales y, consecuentemente, los que se modificarán a lo largo del proceso iterativo. Por otro lado, para poder extraer conclusiones sobre la influencia de estos parámetros, se llevarán a cabo varios ensayos metalográficos, como la observación de la interfase a través del microscopio óptico o la aplicación de la tecnología SEM para la visualización de la microestructura.

En el Apartado 5.1.3. del Capítulo 1, se describen el proceso de preparación de las superficies de observación en las probetas. Además de lo descrito anteriormente, de cara al posterior empleo de la tecnología SEM, fue necesaria la aplicación de una fase de pulido adicional en la que se aplicaba sobre un nuevo paño de pulido una suspensión ligeramente básica de pulido de óxido a base de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), hasta garantizar que la microestructura del material pudiera visualizarse a través del microscopio óptico. Entre las fases de pulido más finas, así como tras la aplicación del pulido con OPS, se sumergieron las probetas en un baño de ultrasonidos con el objetivo de eliminar cualquier tipo de residuo (granos de la pasta de diamante o del dióxido de silicio) que hubiera podido adherirse a la superficie de observación durante dicha operación.

Por otro lado, para estos ensayos, además de emplear el microscopio óptico para el análisis de las superficies de observación, se aplicará también la visualización de las probetas a través de un microscopio SEM (Thermofisher Helios 600i), como el que se expone en la Figura 6.3. Este equipo funciona enviando un haz de electrones que barre la superficie de una muestra y que, al interactuar con ella, se generan señales (como electrones secundarios y retrodispersados) que son detectadas para formar imágenes de alta resolución de la topografía y composición superficial de la superficie analizada. Con esto se pretende analizar el comportamiento de cada una de las materias primas empleadas cuando entran en contacto entre sí en las interfases de la probeta multimaterial, así como la propia microestructura de cada uno de los materiales en puntos aislados y estables. Además, también se ha llevado a cabo un estudio de la composición química de la interfase de las probetas, para estudiar la evolución de la transición entre ambos filamentos depositados.

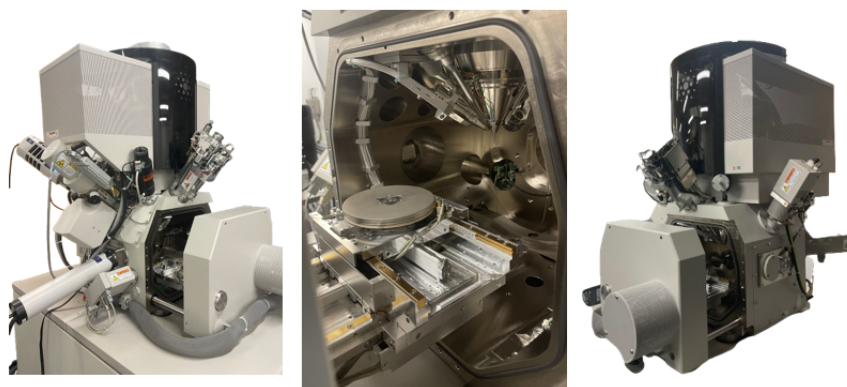


Figura 6.3: Equipo SEM empleado para el estudio de la microestructura de las probetas (Elaboración propia).

## 6.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras haber descrito la metodología de trabajo para realizar el estudio de la influencia de los parámetros de impresión en las propiedades de las interfases entre varios materiales para impresiones multimaterial de tipo vóxel, este apartado tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos de dicho proceso experimental. Para ello, se recorrerá el proceso iterativo seguido

hasta la obtención de un perfil de parámetros que optimice dichas propiedades mecánicas y que minimice la porosidad residual en estas zonas. Por otro lado, se expondrán las imágenes digitales obtenidas de los ensayos metalográficos aplicados sobre las probetas, con las que se extrajeron las conclusiones requeridas tras cada iteración. Además, tras el proceso iterativo, se llevará a cabo un análisis de la microestructura de estas probetas multimaterial, para observar la interacción existente entre ambos materiales en cada una de las interfases, así como la propia evolución de la microestructura de estas materias primas al ser sometidas a las condiciones de trabajo de los sistemas DED.

### 6.2.1. ITERACIÓN 1

Como se mencionó anteriormente, para esta primera iteración se ha decidido partir del perfil 'Verified Density' predefinido por el fabricante, para ambos materiales, teniendo en cuenta la reducción del número de contornos exteriores de 2 a 1, para ajustar el perfil a las dimensiones de los vóxeles. Consecuentemente, se emplearán los valores predefinidos para la superposición de contornos y para la superposición contorno-relleno, que son los parámetros que gobiernan sobre el comportamiento objeto de estudio. La Tabla 6.1 muestra los parámetros más significativos que definen la impresión llevada a cabo en esta iteración y la probeta impresa, así como su superficie de observación ya preparada se exponen en la Figura 6.4. Por último, la Figura 6.5 muestra las imágenes obtenidas mediante los ensayos metalográficos, empleando un microscopio óptico, aplicados sobre las interfases (vertical y horizontal) entre ambos materiales de la superficie de observación de la probeta de esta iteración.

Tabla 6.1: Parámetros de impresión principales para la Iteración 1 de impresión multimaterial.

<b>Probeta Multimaterial - Iteración 1</b>		
Material	'Stainless Steel 316L'	'Mild Steel ER70S-6'
Perfil de Impresión Base	'Verified Density'	'Verified Density'
Número de Contornos	1	1
Superposición entre contornos (%)	0	0
Superposición contorno-relleno (%)	10	10

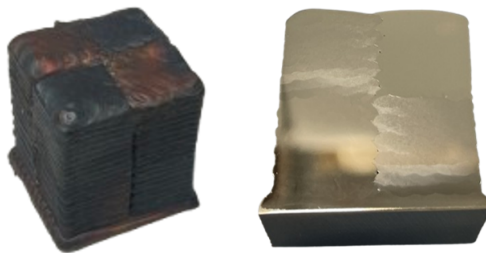


Figura 6.4: Probeta fabricada para la iteración 1 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia).

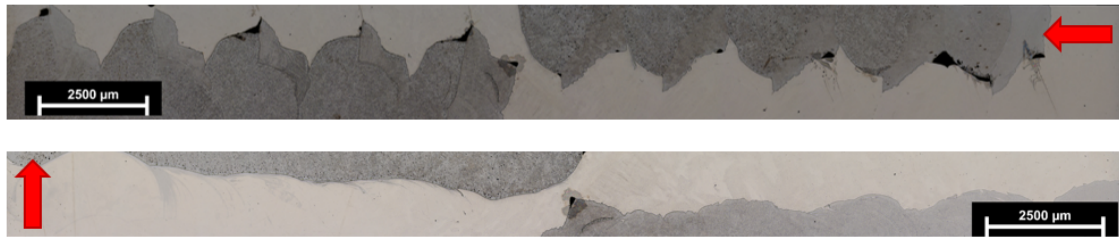


Figura 6.5: Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 1, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia).

Como se puede observar, pese a que en el análisis cualitativo de la interfase horizontal de la probeta no se puede identificar ningún poro de tamaño significativo, a excepción del que se crea en la unión de ambas interfases; en la interfase vertical se pueden identificar grandes poros que recorren la línea de unión entre ambos materiales y que se localizan en el extremo de las trayectorias de deposición correspondientes a las zonas depositadas con acero blando. Además, para aumentar la profundidad de este estudio, se ha llevado a cabo un análisis de la porosidad interna en ambas interfases de la probeta con el objetivo de poder establecer ciertas conclusiones sobre los resultados obtenidos mediante el perfil de parámetros expuesto anteriormente. Este estudio se ha llevado a cabo mediante el software 'ImageJ', siguiendo un proceso experimental similar al descrito en el capítulo anterior. Este conlleva la aplicación de una descomposición RGB que separa la imagen en canales de color para elegir el de mejor contraste, aplicar un umbral y así diferenciar poros de la matriz metálica, permitiendo calcular con precisión el porcentaje de porosidad. Cabe mencionar que se han empleado unos parámetros de contraste sobre las imágenes diferentes a los aplicados en el estudio llevado a cabo en el capítulo anterior, con el objetivo de aislar los poros generados en la interfase entre ambos materiales. De esta forma, se han obtenido los resultados que se exponen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 1.

Iteración	Dirección Interfase	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Iteración 1	Vertical	R	0.498	0.411
		G	0.503	0.560
		B	0.511	0.613
		Medio	0.503	0.528
	Horizontal	R	0.039	0.171
		G	0.037	0.269
		B	0.034	0.193
	Medio	0.036	0.211	

Este análisis cuantitativo concuerda con las observaciones cualitativas realizadas anteriormente. En la interfase horizontal, el porcentaje de porosidad observado es muy reducido, pero el tamaño medio de los poros observados es significativo. Por otro lado, la porosidad en la interfase vertical, así como el tamaño medio de los defectos que la recorren son muy altos y pueden afectar seriamente a las propiedades mecánicas de la probeta fabricada. Por lo tanto, se ha decidido realizar una nueva iteración cambiando el perfil de parámetros con el que se imprime la probeta multimaterial, de forma que se aumente tanto la superposición entre contornos como la superposición entre los contornos y el relleno de las piezas.

## 6.2.2. ITERACIÓN 2

Tal y como se concluyó en la anterior iteración, al observarse defectos de porosidad residual tanto a simple vista, como a través de los ensayos metalográficos, se ha optado por aumentar la superposición entre los contornos depositados y la superposición contorno-relleno. Sin embargo, se ha decidido mantener tanto el perfil base para ambos materiales, al ser la mejor opción para garantizar una porosidad residual mínima, como el número de contornos externos. La Tabla 6.3 muestra los parámetros más significativos que definen la impresión llevada a cabo en esta iteración y la probeta impresa, así como su superficie de observación ya preparada, se exponen en la Figura 6.6. Por último, la Figura 6.7 ilustra las imágenes obtenidas mediante los ensayos metalográficos aplicados sobre la superficie de observación de la probeta de esta iteración.

Tabla 6.3: Parámetros de impresión principales para la Iteración 2 de impresión multimaterial.

Probeta Multimaterial - Iteración 2		
Material	'Stainless Steel 316L'	'Mild Steel ER70S-6'
Perfil de Impresión Base	'Verified Density'	'Verified Density'
Número de Contornos	1	1
Superposición entre contornos (%)	50	50
Superposición contorno-relleno (%)	20	20

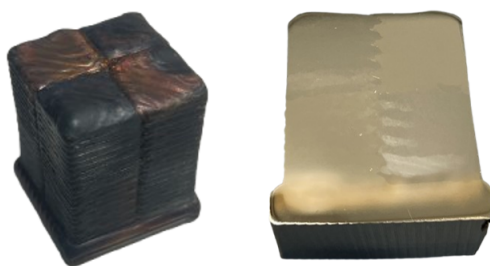


Figura 6.6: Probeta fabricada para la iteración 2 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia).

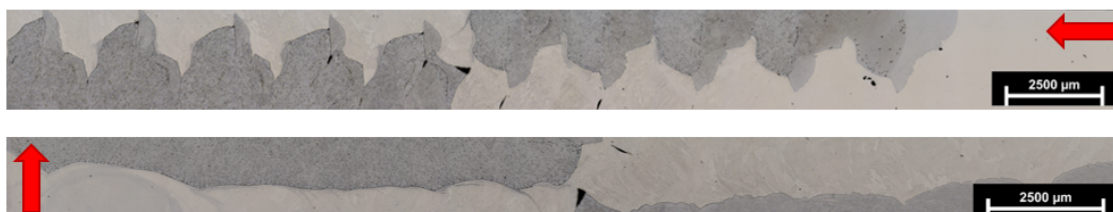


Figura 6.7: Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 2, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia).

Como se puede observar, en la interfase horizontal, al igual que ocurría en la iteración anterior, el único poro distinguible se encuentra en la intersección entre ambas interfases. Además, en la interfase vertical se ha reducido, tanto la cantidad como el tamaño de los poros que recorren la línea de unión entre ambos materiales y que se localizan en el extremo de las trayectorias de deposición correspondientes a las zonas depositadas con acero blando. Bajo este primer análisis cualitativo, se puede concluir que las modificaciones implementadas en esta iteración han

mejorado las condiciones de porosidad existente en la interfase. Sin embargo, para contrastar esta hipótesis, se ha llevado a cabo un análisis de la porosidad interna en ambas interfases de la probeta. Este estudio se ha llevado a cabo mediante el software 'ImageJ', siguiendo un proceso experimental similar al expuesto para el resto de iteraciones de este estudio, aislando únicamente los poros generados en la interfase entre materiales. De esta forma, se han obtenido los resultados que se exponen en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 2.

Iteración	Dirección Interfase	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Iteración 2	Vertical	R	0.128	0.245
		G	0.122	0.308
		B	0.125	0.481
		Medio	0.125	0.429
	Horizontal	R	0.088	0.643
		G	0.088	0.861
		B	0.094	0.756
		Medio	0.091	0.753

Este análisis cuantitativo concuerda con las observaciones cualitativas realizadas anteriormente. En la interfase horizontal, el porcentaje de porosidad observado es muy reducido, pero, al igual que ocurría en la iteración anterior, el tamaño medio de los poros observados es significativo. Por otro lado, la porosidad en la interfase vertical, así como el tamaño medio de los defectos que la recorren, se han reducido en gran medida, disminuyendo los efectos sobre las propiedades mecánicas de la probeta. Para la siguiente iteración, se ha decidido aumentar el número de contornos (de 1 a 2) de la probeta multimaterial con el objetivo de estudiar la influencia de este parámetro en las propiedades de las interfases entre materiales. Por lo tanto, se mantendrán el resto de parámetros de fabricación constantes, aislando la influencia del factor objeto de estudio.

### 6.2.3. ITERACIÓN 3

Para esta nueva iteración, al haberse observado una mejora sustancial en la porosidad residual de la interfase en la dirección vertical de la probeta, se ha decidido comprobar la verdadera influencia del número de contornos externos en el comportamiento del proceso de impresión multimaterial sobre las zonas de interés. Para ello se ha vuelto a incrementar el número de contornos, manteniéndose constante el valor del resto de parámetros (superposición entre contornos y superposición contorno-relleno). Además, se ha decidido mantener el perfil base para ambos materiales. La Tabla 6.5 recoge los parámetros más significativos que definen la impresión llevada a cabo en esta iteración y la probeta impresa, así como su superficie de observación ya preparada, se exponen en la Figura 6.8. Por último, la Figura 6.9 muestra las imágenes obtenidas mediante los ensayos metalográficos aplicados sobre la superficie de observación de la probeta de esta iteración.

Tabla 6.5: Parámetros de impresión principales para la Iteración 3 de impresión multimaterial.

Probeta Multimaterial - Iteración 3		
Material	'Stainless Steel 316L'	'Mild Steel ER70S-6'
Perfil de Impresión Base	'Verified Density'	'Verified Density'
Número de Contornos	2	2
Superposición entre contornos (%)	50	50
Superposición contorno-relleno (%)	20	20

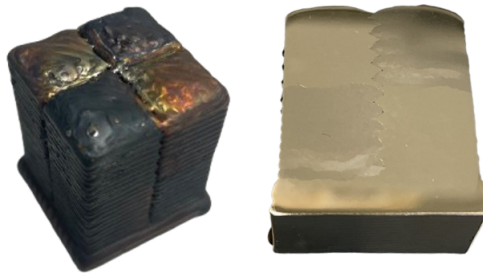


Figura 6.8: Probeta fabricada para la iteración 3 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia).

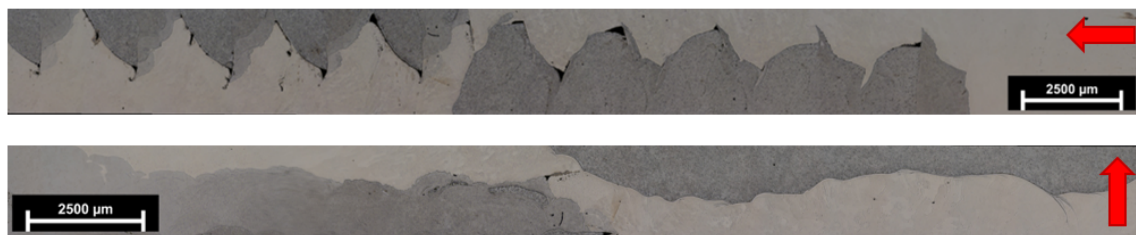


Figura 6.9: Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 3, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia).

Como se puede observar, en la interfase horizontal, pese a que la cantidad, tamaño y localización de los poros es similar al del resto de iteraciones realizadas, se puede ver cómo la deposición de material se ha realizado de forma más irregular, lo que se puede deber a pequeñas acumulaciones de material fundido en aquellas zonas donde los contornos se superponen. Además, en la interfase vertical a simple vista se puede distinguir cómo la porosidad ha aumentado, mientras que los poros ya no se localizan únicamente en el extremo final de las trayectorias de deposición, sino también a lo largo de la mayor parte de la superficie de contacto entre los distintos materiales, dando lugar a poros alargados que afectan negativamente al comportamiento mecánico de la pieza. Bajo este primer análisis cualitativo, se puede concluir que las modificaciones implementadas en esta iteración han empeorado las condiciones de porosidad existente en la interfase, por lo que el aumento del número de contornos en la probeta parece que afecta negativamente a sus propiedades. Sin embargo, para contrastar esta hipótesis, se ha llevado a cabo un análisis de la porosidad interna en ambas interfases de la probeta. Este estudio se ha realizado mediante el software 'ImageJ', siguiendo un proceso experimental similar al expuesto para el resto de iteraciones de este estudio, aislando únicamente los poros generados en la interfase entre materiales. De esta forma, se han obtenido los resultados que se exponen en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 3.

Iteración	Dirección Interfase	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Iteración 3	Vertical	R	0.386	0.214
		G	0.398	0.257
		B	0.362	0.436
		Medio	0.398	0.302
	Horizontal	R	0.034	0.234
		G	0.038	0.326
		B	0.026	0.478
		Medio	0.033	0.346

Este análisis cuantitativo concuerda con las observaciones cualitativas realizadas anteriormente. En la interfase horizontal, el porcentaje de porosidad observado es muy reducido, pero, al igual que ocurría en la iteración anterior, el tamaño medio de los poros observados es significativo. Por otro lado, la porosidad en la interfase vertical, así como el tamaño medio de los defectos que la recorren, han aumentado significativamente. Estas conclusiones se pueden emplear para establecer que, para la geometría a materializar, un aumento en el número de contornos con los que se fabrican las probetas afecta negativamente a las propiedades mecánicas finales de las piezas. Para la siguiente iteración, se ha decidido continuar con la optimización de los parámetros de superposición que en iteraciones anteriores han mostrado influir positivamente en los resultados obtenidos.

#### 6.2.4. ITERACIÓN 4

Para esta nueva iteración, se ha decidido aumentar el porcentaje de superposición contorno-relleno, manteniendo constante la superposición entre los contornos, ya que se ha podido observar cómo un exceso de material depositado en estas zonas puede propiciar la irregularidad de las trayectorias de deposición, derivando en un aumento en la porosidad interna. Además, se ha decidido mantener el perfil base para ambos materiales. La Tabla 6.7 muestra los parámetros más significativos que definen la impresión llevada a cabo en esta iteración y la probeta impresa, así como su superficie de observación ya preparada, se exponen en la Figura 6.10. Por último, la Figura 6.11 ilustra las imágenes obtenidas mediante los ensayos metalográficos aplicados sobre la superficie de observación de la probeta de esta iteración.

Tabla 6.7: Parámetros de impresión principales para la Iteración 4 de impresión multimaterial.

Probeta Multimaterial - Iteración 4		
Material	'Stainless Steel 316L'	'Mild Steel ER70S-6'
Perfil de Impresión Base	'Verified Density'	'Verified Density'
Número de Contornos	1	1
Superposición entre contornos (%)	50	50
Superposición contorno-relleno (%)	35	35

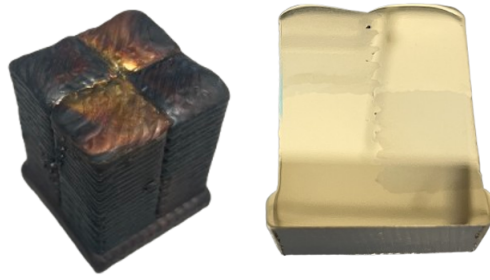


Figura 6.10: Probeta fabricada para la iteración 4 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia).

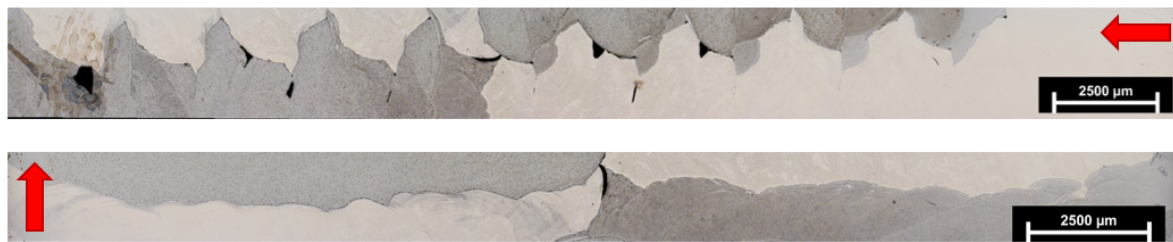


Figura 6.11: Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 4, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia).

Como se puede observar, en la interfase horizontal, las trayectorias de deposición han recuperado su disposición homogénea, manteniendo la concentración de la porosidad en la zona de intersección entre ambas interfases. Además, en la interfase vertical a simple vista se puede distinguir cómo la porosidad continúa siendo elevada, mientras que los poros ya no se localizan en el extremo final de las trayectorias de deposición, sino que lo hacen en la zona central de la superficie de contacto entre trayectorias, pero con una disposición no homogénea, dando lugar a poros más grandes que en iteraciones anteriores. Bajo este primer análisis cualitativo, se puede concluir que las modificaciones implementadas en esta iteración han empeorado las condiciones de porosidad existentes en las interfases con respecto a los resultados de la segunda iteración. Sin embargo, para contrastar esta hipótesis, se ha llevado a cabo un análisis de la porosidad interna en ambas interfases de la probeta. Este estudio se ha llevado a cabo mediante el software 'ImageJ', siguiendo un proceso experimental similar al expuesto para el resto de iteraciones de este estudio, aislando únicamente los poros generados en la interfase entre materiales. De esta forma, se han obtenido los resultados que se exponen en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 4.

Iteración	Dirección Interfase	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Iteración 4	Vertical	R	0.587	2.003
		G	0.571	2.010
		B	0.619	1.995
		Medio	0.592	2.003
	Horizontal	R	0.097	0.207
		G	0.098	0.601
		B	0.103	0.765
		Medio	0.099	0.524

Este análisis cuantitativo concuerda con las observaciones cualitativas realizadas anteriormente. En la interfase horizontal, el porcentaje de porosidad observado es muy reducido, pero, al igual que ocurría en la iteración anterior, el tamaño medio de los poros observados es significativo. Por otro lado, la porosidad en la interfase vertical, así como el tamaño medio de los defectos que la recorren, ha aumentado significativamente en comparación con los resultados experimentales obtenidos en la segunda iteración. Por lo tanto, un nuevo aumento en el parámetro objeto de estudio ha influido negativamente en la porosidad interna en las interfases de la probeta multimaterial, empeorando sus propiedades mecánicas. Para la siguiente iteración, se ha decidido aumentar aún más dicho parámetro con el objetivo de confirmar la hipótesis anterior.

### 6.2.5. ITERACIÓN 5

Para esta última iteración, se ha decidido aumentar aún más el porcentaje de superposición contorno-relleno, con el objetivo de comprobar si un valor excesivamente alto puede influir negativamente en las propiedades de la probeta. Por lo tanto, se ha decidido mantener el perfil base para ambos materiales, a excepción del parámetro objetivo. La Tabla 6.9 muestra los parámetros más significativos que definen la impresión llevada a cabo en esta iteración y la probeta impresa, así como su superficie de observación ya preparada, se exponen en la Figura 6.12. Por último, la Figura 6.13 presenta las imágenes obtenidas mediante los ensayos metalográficos aplicados sobre la superficie de observación de la probeta de esta iteración.

Tabla 6.9: Parámetros de impresión principales para la Iteración 5 de impresión multimaterial.

<b>Probeta Multimaterial - Iteración 5</b>		
Material	'Stainless Steel 316L'	'Mild Steel ER70S-6'
Perfil de Impresión Base	'Verified Density'	'Verified Density'
Número de Contornos	1	1
Superposición entre contornos (%)	50	50
Superposición contorno-relleno (%)	50	50

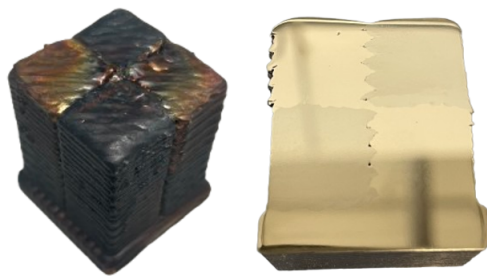


Figura 6.12: Probeta fabricada para la iteración 5 (izquierda) y su superficie de observación (derecha) (Elaboración propia).



Figura 6.13: Interfases vertical (parte superior) y horizontal (parte inferior) de la probeta multimaterial de la iteración 5, donde las flechas indican la dirección de impresión (Elaboración propia).

Como se puede observar, en la interfase horizontal, las trayectorias de deposición han vuelto a disponerse de forma irregular, debido al exceso de material fundido en alguna de las zonas externas de la probeta. Además, en la interfase vertical a simple vista se puede distinguir cómo la porosidad ha aumentado con respecto a la iteración anterior, mientras que los poros vuelven a localizarse en el extremo final de las trayectorias de deposición, presentándose indistintamente en las zonas depositadas con acero inoxidable, así como en aquellas depositadas con acero blando. Bajo este primer análisis cualitativo, se puede inferir que este nuevo aumento en la superposición contorno-relleno ha empeorado las propiedades de la probeta multimaterial. Sin embargo, para contrastar esta hipótesis, se ha realizado un análisis de la porosidad interna en ambas interfases de la probeta. Este estudio se ha llevado a cabo mediante el software 'ImageJ', siguiendo un proceso experimental similar al expuesto para el resto de iteraciones de este estudio, aislando únicamente los poros generados en la interfase entre materiales. De esta forma, se han obtenido los resultados que se exponen en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Análisis de la porosidad en las interfases de la probeta de la iteración 5.

Iteración	Dirección Interfase	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Iteración 5	Vertical	R	0.613	0.604
		G	0.648	1.007
		B	0.655	1.894
		Medio	0.639	1.168
	Horizontal	R	0.148	2.009
		G	0.140	2.013
		B	0.136	2.870
		Medio	0.141	2.297

Este análisis cuantitativo concuerda con las observaciones cualitativas realizadas anteriormente. En la interfase horizontal, el porcentaje de porosidad observado es reducido, pero, al igual que ocurría en la iteración anterior, el tamaño medio de los poros observados es significativo. Por otro lado, la porosidad en la interfase vertical ha continuado aumentando con respecto a los resultados experimentales obtenidos en la iteración anterior. Por lo tanto, un nuevo aumento en el parámetro objeto de estudio ha influido negativamente en la porosidad interna en las interfases de la probeta multimaterial, empeorando sus propiedades mecánicas. De esta forma, se puede dar por concluido el análisis iterativo, ya que con la información extraída se ha podido establecer un intervalo de trabajo óptimo para los parámetros del perfil de impresión para las probetas multimaterial.

### 6.2.6. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

Una vez concluido el análisis iterativo sobre el perfil de parámetros de impresión de las probetas, se ha llevado a cabo un estudio de la microestructura de las piezas fabricadas. Para ello se empleó el microscopio electrónico de barrido presentado anteriormente para analizar la microestructura tanto en la interfase vertical como en la horizontal de la probeta multimaterial, así como en zonas alejadas de la unión entre trayectorias de distinto material, donde la microestructura ya se ha estabilizado. Esto permitirá observar la evolución de los granos de cada uno de los materiales empleados a lo largo de la zona de transición entre ellos, así como los efectos del orden en el que se depositan cada uno de los materiales y la variación existente entre los parámetros térmicos aplicados para la fusión de los filamentos metálicos utilizados.

Para ello, se han tomado como referencia las imágenes adquiridas sobre la primera probeta del proceso iterativo (fabricada con los perfiles originales determinados por el fabricante) y las extraídas de la probeta de la segunda iteración (fabricada con los parámetros más próximos al perfil de trabajo considerado como óptimo). De esta forma, la Figura 6.14 muestra las imágenes microestructurales obtenidas sobre la superficie de observación de la probeta de la primera iteración. Para ello, se ha empleado un detector de electrones primarios CBS (del inglés, 'Concentric Backscatter'), que capta los electrones retrodispersados en anillos concéntricos, lo que mejora el contraste por número atómico y permite obtener imágenes composicionales más claras de la muestra. Así, se ha podido visualizar la estructura y distribución de los granos microestructurales de la probeta. Además, se ha aplicado un detector de electrones secundarios ETD (del inglés, 'Everhart-Thornley Detector') que permite generar imágenes con gran detalle topográfico, mostrando texturas, bordes y rugosidades de la superficie de manera muy clara, pudiendo apreciar la presencia de cualquier tipo de porosidad. Por otro lado, la Figura 6.15 hace lo propio con la probeta de la segunda iteración.

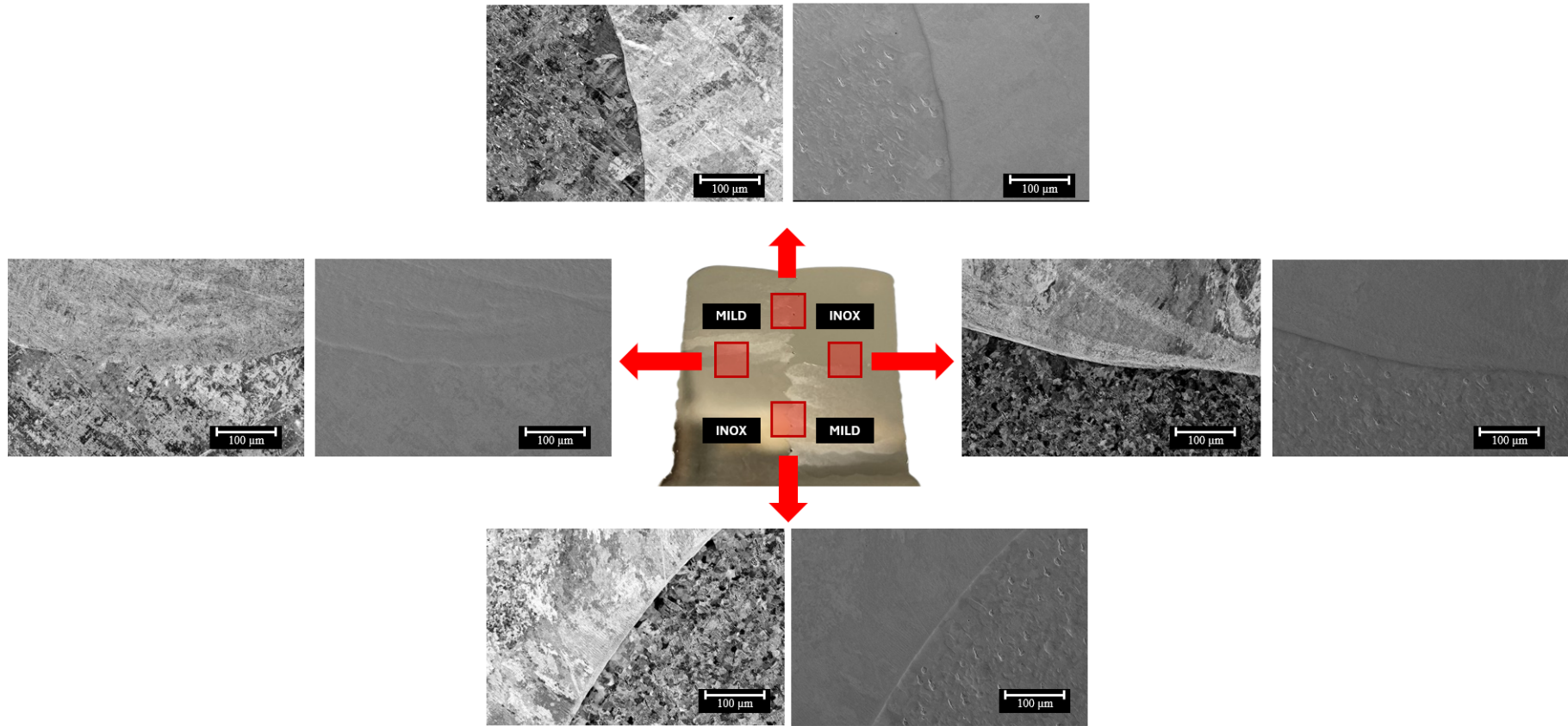


Figura 6.14: Microestructuras observadas en la interfase de la probeta de la iteración 1 (Elaboración propia).

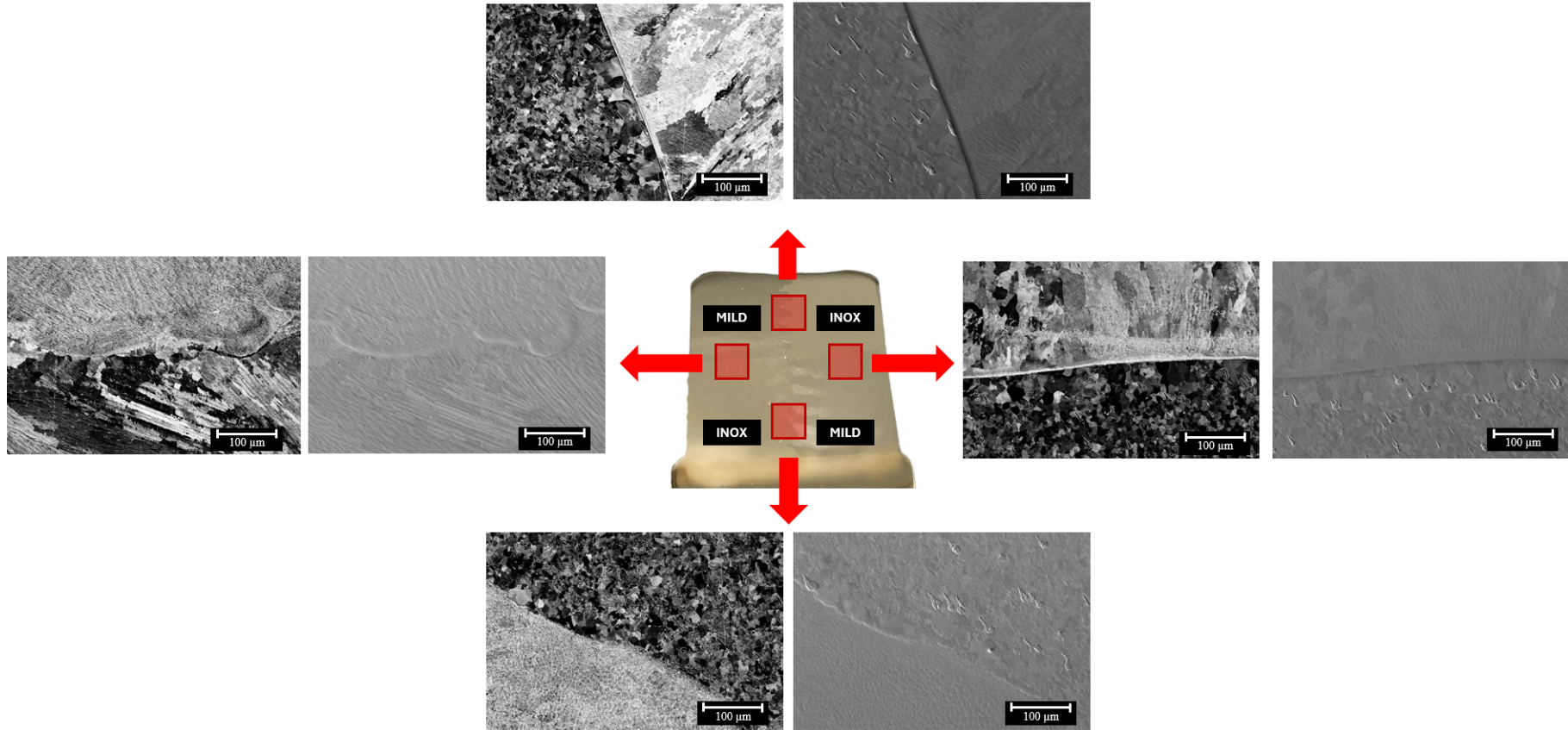


Figura 6.15: Microestructuras observadas en la interfase de la probeta de la iteración 2 (Elaboración propia).

Como se puede observar en las imágenes presentadas, por un lado, en la interfaz horizontal en las zonas donde se depositan primeramente las capas de acero inoxidable para luego continuar depositando capas de acero blando, se puede distinguir cómo el acero inoxidable se ha materializado siguiendo una microestructura anisotrópica de tipo columnar o laminar. Esto coincide con los procesos de solidificación direccional propios del sistema de fabricación de tipo DED, donde el movimiento del cabezal láser, que va fundiendo el filamento metálico, provoca que el calor se disipe en una dirección predominante, favoreciendo el crecimiento de granos en forma de columnas. Además, se puede ver cómo en el momento en el que se cambia el material que se está depositando, este suceso varía y las capas depositadas con acero blando pierden esta distribución y orientación de sus granos para presentar una microestructura mucho más compleja y homogénea, en la que no se pueden distinguir con claridad sus granos, dando lugar a una microestructura más fina en la que no se pueden distinguir formas regulares o límites de grano. Esto se puede deber a que en esta zona de la probeta, los dos materiales empleados no quedan perfectamente separados, sino que se genera una franja en la que se mezclan las composiciones químicas de ambos materiales, derivando en una reestructuración de su microestructura. Cabe destacar que en procesos experimentales posteriores se determinará si esta disposición se extiende al resto de capas de la probeta o, si por el contrario, existe una zona donde el acero blando recupera una distribución más ordenada.

Por otro lado, en zonas contrarias de la interfase horizontal, donde primero se depositan las capas de acero blando y, sobre ellas, otras de acero inoxidable, la microestructura observada cambia. Las capas de acero blando que habían sido previamente depositadas presentan unos granos con un tamaño aproximadamente homogéneo en todas sus direcciones, con una geometría aproximadamente circular pero ligeramente irregular, que se puede traducir en la existencia de una microestructura de granos equiaxiales. Esta diferencia se puede deber a la mayor potencia térmica aportada por el láser para fundir este tipo de acero, con respecto a los requerimientos del filamento de acero inoxidable, lo que puede influir en que estas capas no sufran un enfriamiento tan repentino antes de que se depositen nuevas capas de material fundido sobre ellas, favoreciendo un enfriamiento más uniforme y evitando la anisotropía direccional en su microestructura. Además, en las regiones más próximas a la interfase horizontal, se puede observar un aumento del tamaño de los granos de acero blando, posiblemente originado por las concentraciones térmicas en la interfase. Por otro lado, en la deposición de las primeras capas de acero inoxidable tras el cambio de material, se puede detectar cómo ahora la franja que presenta una microestructura desordenada debido a la combinación de la composición química de ambos materiales es mucho más estrecha, dejando ver tras ella una microestructura con límites de grano más definidos. Esta variación en el comportamiento de las microestructuras se puede deber a la diferencia en los requerimientos térmicos comentada anteriormente. El acero inoxidable, al requerir menos potencia térmica que el acero blando para fundirse, dificulta que se produzca el intercambio de componentes químicos entre ambos materiales en estado fundido.

En cuanto a las microestructuras observadas en las diferentes zonas de la interfase vertical, se pueden extender todos los comentarios mencionados anteriormente. Como el sistema de fabricación intercala las capas de los diferentes materiales a lo largo de toda esta interfase, se pueden encontrar dos situaciones que concuerdan con los datos expuestos anteriormente. En las zonas donde sobre una capa de acero inoxidable se monta una capa de acero blando, se puede ver cómo existe una franja donde la microestructura está completamente desordenada, pasando a materializarse las trayectorias más exteriores de acero blando siguiendo una distribución equiaxial y más uniforme. Sin embargo, en las regiones donde se monta una capa depositada en acero inoxidable sobre una capa de acero blando, se puede apreciar cómo la microestructura transiciona desde una microestructura de granos equiaxiales (propia de los granos de acero blando) hasta una microestructura de tipo columnar con granos más grandes y alargados (propia del acero inoxidable), pasando por una zona intermedia donde se da un ligero agrandamiento de los

granos de acero blando más próximos a la interfase vertical, unido a una pequeña franja que presenta una microestructura mezclada.

Por último, las imágenes obtenidas muestran cómo los patrones concluidos para el comportamiento de las microestructuras de los diferentes materiales empleados a lo largo de las distintas regiones de las piezas coinciden para las dos probetas analizadas, por lo que se podrían generalizar para el resto de probetas fabricadas y futuras fabricaciones. Además, el detector ETD arroja cierta información sobre la rugosidad de la superficie de la pieza en las zonas depositadas con acero blando. Como se puede observar, estas regiones presentan pequeñas porosidades de tamaño muy reducido a lo largo de toda la superficie analizada, lo que puede influir en los resultados de porosidad interna obtenidos en fases anteriores del proceso experimental y afectar a las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas.

Además del estudio experimental anterior, también se llevó a cabo un estudio de la evolución de las microestructuras de ambos materiales durante la transición existente entre materiales en cada una de las interfases existentes en la probeta multimaterial. Esto implicó la observación mediante el microscopio electrónico de barrido de la microestructura presente en las interfases horizontal y vertical, contemplando todas las combinaciones que se dan según el diseño de la probeta analizada, así como la microestructura propia de aquellas zonas lo suficientemente alejadas de las interfases como para que éstas dejen de tener influencia sobre el comportamiento de los granos cristalizados para cada material. Con el objetivo de aumentar la profundidad de este estudio, se ha decidido realizar este procedimiento sobre la superficie de observación de la probeta de la iteración 3, para poder comprobar también que los resultados obtenidos para el estudio anterior a nivel microestructural no se ven afectados si se altera el número de contornos con el que se fabrican las probetas. Los resultados obtenidos están expuestos en la Figura 6.16, donde en este caso solo se presentarán los resultados obtenidos a través del detector CBS, ya que es el que aporta la información más relevante para el objetivo de este estudio.

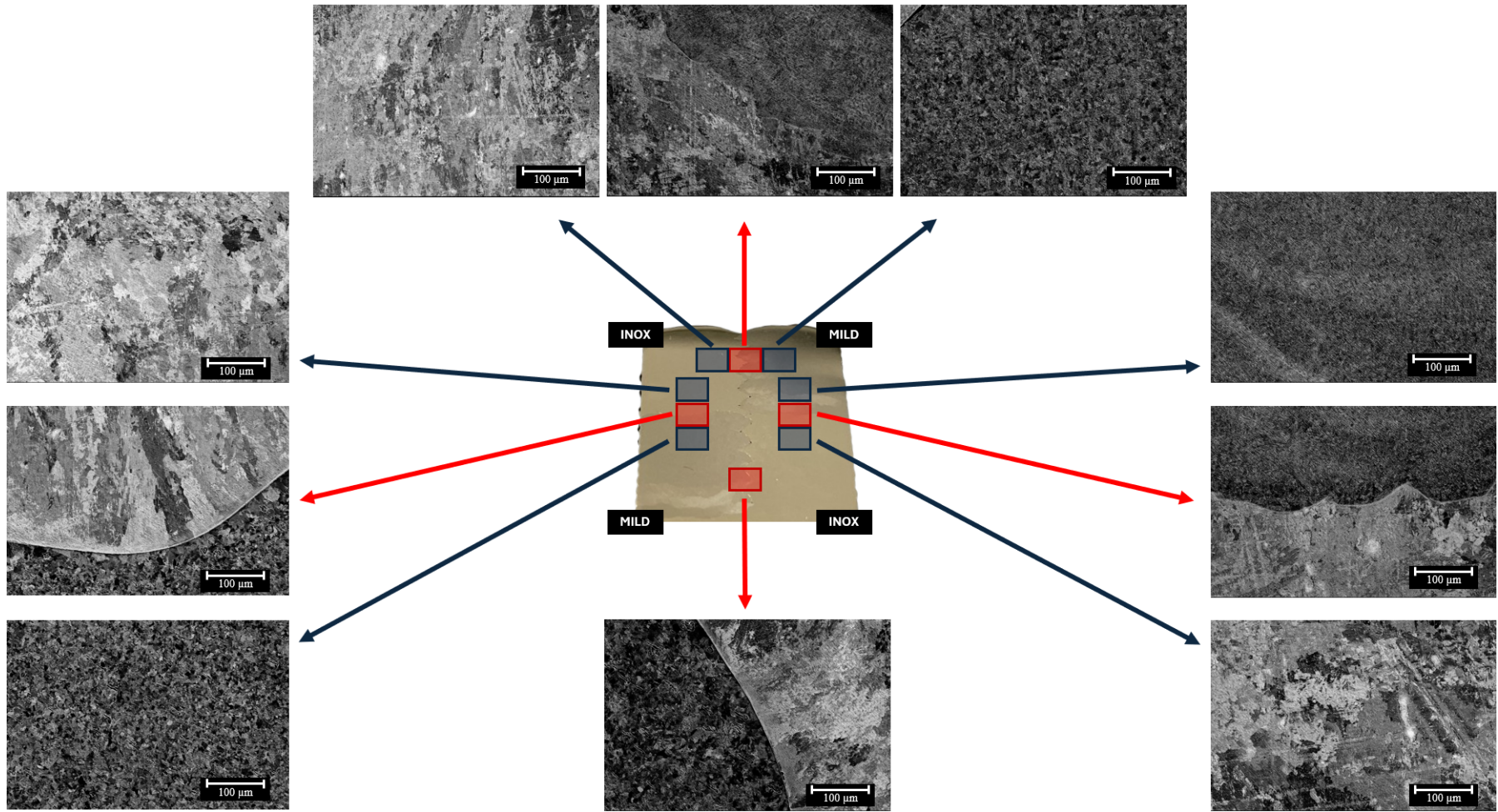


Figura 6.16: Estudio de la evolución microestructural a lo largo de las interfaces de la probeta de la iteración 3 (Elaboración propia).

Como se puede observar en las imágenes extraídas mediante el microscopio electrónico de barrido, los resultados e hipótesis extraídas en los procedimientos experimentales anteriores se pueden extender a esta nueva probeta. El número de contornos con el que se fabrica la pieza no influye de forma notable en la microestructura que presentan las diferentes zonas de la probeta objeto de estudio, pese a ser un factor de gran influencia sobre la porosidad interna observada a lo largo de las interfases entre ellas. Por otro lado, este estudio sirve para verificar la hipótesis de que tras una zona intermedia próxima a la interfase en la que se producen las transiciones entre las diferentes microestructuras observadas para cada material, ambas terminan por estabilizarse a medida que se avanza hacia regiones más exteriores de la probeta. De esta forma, se puede ver como la microestructura de granos equiaxiales formada por exclusivamente acero blando se presenta estable y uniforme en las primeras capas, sufre una transición hacia una microestructura claramente de tipo columnar formada por granos de acero inoxidable en las últimas capas de la probeta, y viceversa. Lo anterior siempre teniendo en cuenta que en función del sentido de la transición en la interfase, se puede producir una franja de mayor o menor tamaño donde la mezcla en la composición química de ambos materiales deriva en una microestructura amorfa sin límites de grano definidos, así como un fenómeno de crecimiento de granos que puede resultar más o menos significativo en función de dicho sentido. Estos comentarios se exponen de forma más clara a través de las indicaciones contenidas en la Figura 6.17.

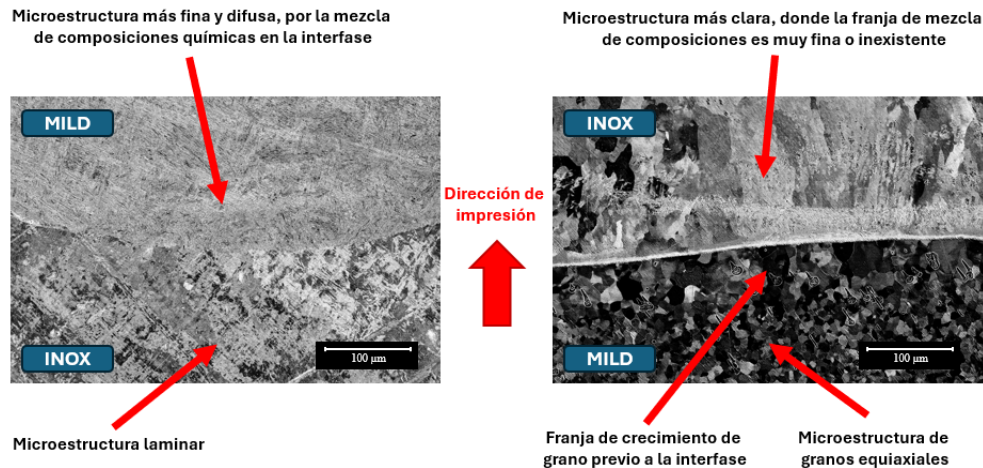


Figura 6.17: Explicación esquemática de los sucesos observados sobre las microestructuras de las probetas multimaterial (Elaboración propia).

Por último, para completar los análisis experimentales realizados empleando el microscopio electrónico de barrido, se ha llevado a cabo un análisis de la evolución de la composición química a lo largo de la interfase horizontal de la probeta de la tercera iteración. Esto se ha realizado para poder observar cómo se produce la transición desde el acero inoxidable hasta el acero blando, y viceversa, observando cómo va evolucionando el porcentaje en la composición química de los componentes principales de ambas aleaciones. La Figura 6.18 expone las nubes de puntos resultantes del análisis de la composición química de los principales elementos de ambas aleaciones (carbono, silicio, potasio, cromo, magnesio, hierro, níquel y molibdeno) a lo largo de la interfase horizontal de la probeta estudiada en la zona donde el acero blando se deposita sobre el acero inoxidable. Mientras, la Figura 6.19 expone los mismos resultados pero orientados a las zonas de la interfase horizontal donde el acero inoxidable se deposita sobre capas previas de acero blando. Además, la Figura 6.20 refleja los resultados obtenidos para un análisis lineal de la composición química en estas últimas zonas.

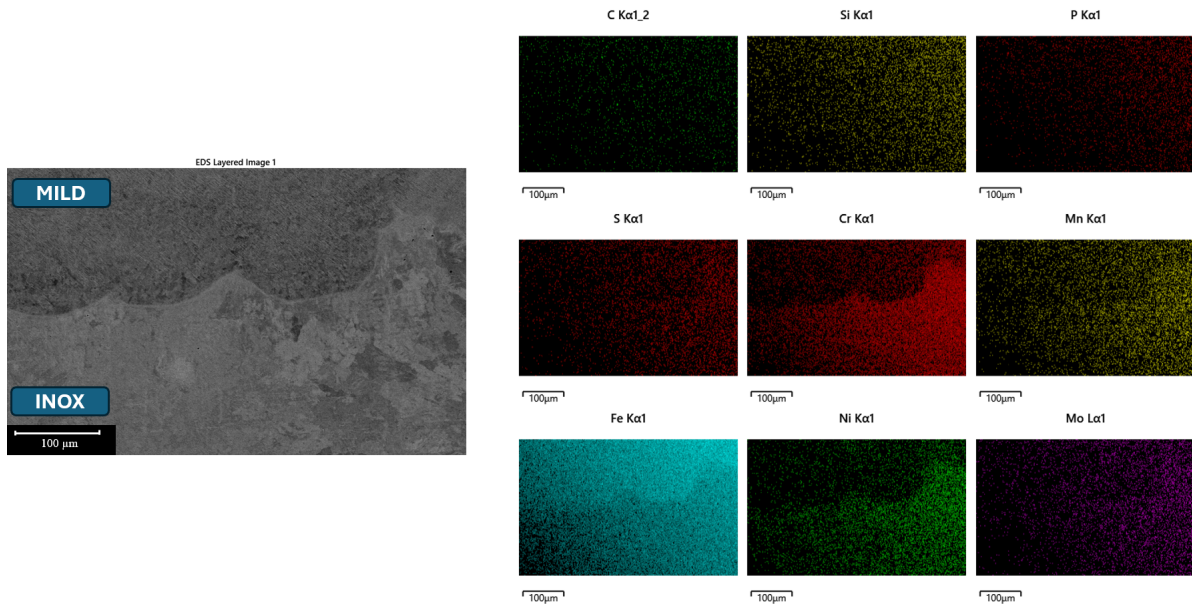


Figura 6.18: Análisis de la composición química de la interfase horizontal en la deposición de acero blando sobre acero inoxidable (Elaboración propia).

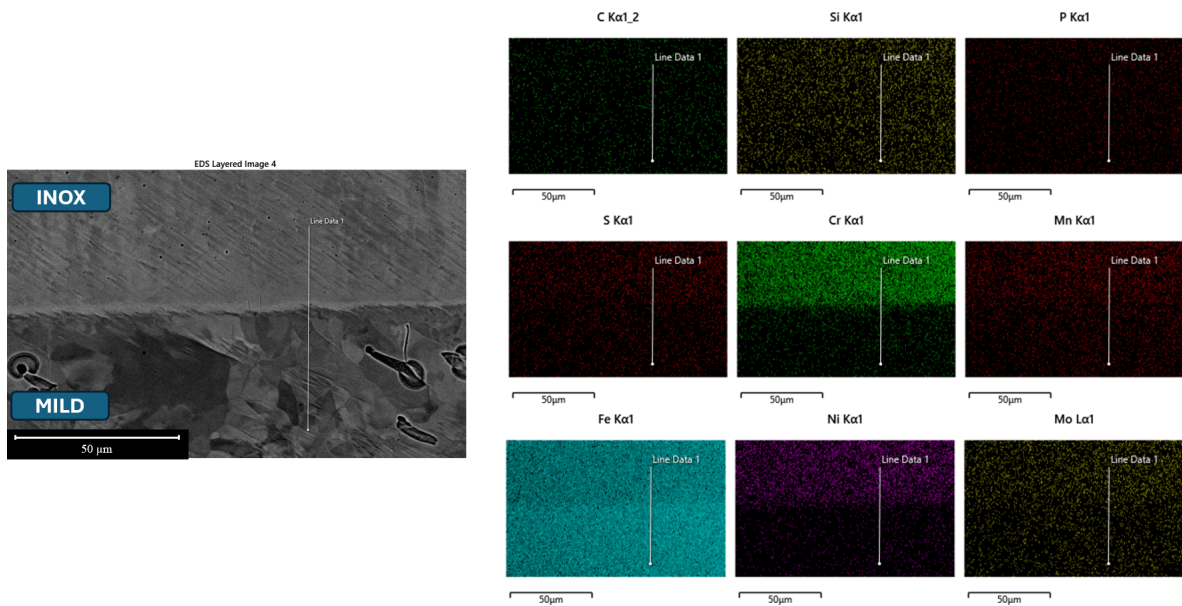


Figura 6.19: Análisis de la composición química de la interfase horizontal en la deposición de acero inoxidable sobre acero blando (Elaboración propia).

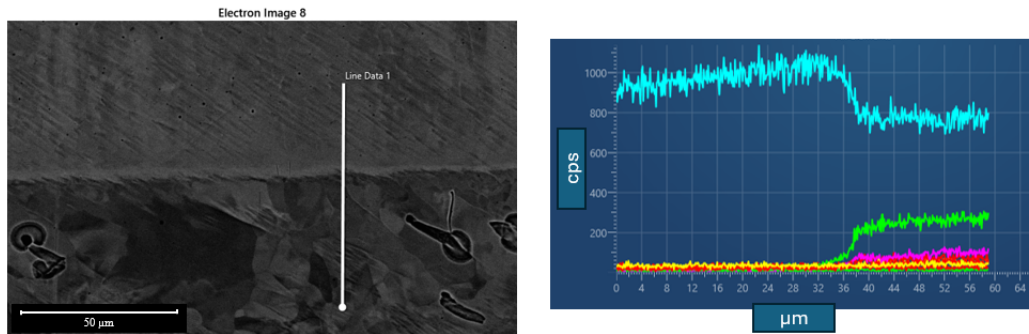


Figura 6.20: Análisis lineal (sobre 'Line Data 1') de la composición química de la interfase horizontal en la deposición de acero inoxidable sobre acero blando. Leyenda de los elementos principales: hierro (azul), cromo (verde), níquel (rosa), manganeso (rojo) y silicio (amarillo) (Elaboración propia).

Por último, este último análisis sobre la evolución de la composición química en las diferentes zonas de la interfase horizontal de la probeta multimaterial arroja información relevante para poder verificar las afirmaciones relativas a la mezcla de ambos materiales fundidos en la interfase. Como se mencionó anteriormente, en las zonas donde se deposita acero blando sobre acero inoxidable, los mayores requerimientos térmicos del primero para su fusión provocan que las capas previamente depositadas de acero inoxidable se vuelvan a fundir, de manera que se combinen ambas composiciones químicas, derivando en una franja en la que la microestructura es desordenada, contrastando con la disposición de granos propia de ambos materiales. Esto concuerda con el análisis realizado, donde se puede ver cómo la transición entre ambas zonas es muy gradual, sin apreciarse ningún cambio brusco en la presencia de ninguno de los componentes químicos principales. Sin embargo, si dicha transición en la interfase se produce en el sentido contrario, el espesor de esta franja de microestructura es muy reducido o incluso, en algunos puntos, inexistente, de manera que al aplicarse menor potencia térmica para fundir el acero inoxidable que la necesaria para hacer lo propio con el acero blando, las capas previas no se refunden, evitando la mezcla de componentes químicos. Esto se puede ver reflejado en una transición mucho más brusca en la evolución de la presencia de los componentes químicos principales de ambos materiales, de forma que se puede intuir de manera clara dónde se produce el cambio de filamento y, por tanto, la posición de la interfase. Estos argumentos se representan con más claridad en la Figura 6.21, donde se compara la evolución en la composición química relativa al porcentaje de hierro, cromo y níquel en ambas situaciones y donde se puede ver cómo afecta el sentido en el que se realice la transición entre materias primas en la interfase.

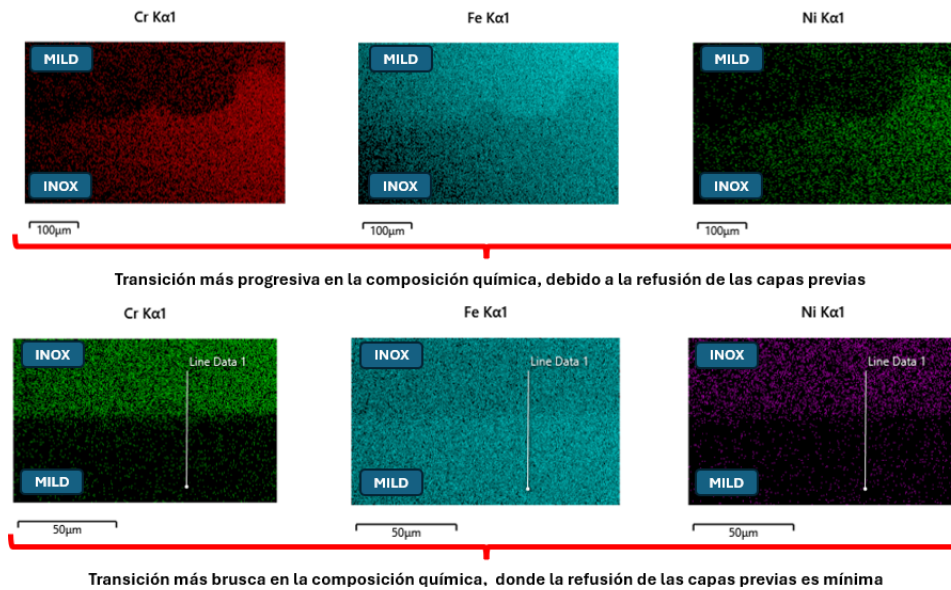


Figura 6.21: Explicación esquemática de los sucesos observados sobre la composición química de las probetas multimaterial (Elaboración propia).

### 6.3. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Como conclusión para este capítulo, a partir del proceso iterativo realizado mediante las probetas multimaterial fabricadas con acero inoxidable y acero blando, se ha podido obtener un perfil de parámetros que resulta cuasi-óptimo para obtener un porcentaje de porosidad interna mínimo en la interfase horizontal y vertical de la probeta, así como una mínima aparición de defectos mecánicos asociados y unas mejores propiedades mecánicas en dichas regiones de interés. El perfil de fabricación empleado para la obtención de la probeta de la segunda iteración, cuyos parámetros diferenciadores se exponen en la Tabla 6.3, permite minimizar los aspectos mencionados anteriormente, alcanzando un porcentaje de porosidad en la interfase horizontal del 0.091 % y del 0.125 % en la interfase vertical, tal y como se puede ver en las imágenes obtenidas mediante el microscopio óptico y los análisis realizados sobre ellas.

Por otro lado, el análisis de la evolución microestructural de las probetas a lo largo de las diferentes zonas de ambas interfases ha servido para extraer ciertas conclusiones sobre el comportamiento de ambos materiales dentro de un proceso de impresión multimaterial. El principal aspecto a considerar es la existencia de una franja donde la composición de ambos metales se mezcla, propiciando la aparición de una microestructura de tipo amorfo, cuando se deposita acero blando sobre acero inoxidable gracias a una refusión de las capas superiores de acero inoxidable. Sin embargo, si la transición se realiza en sentido contrario, el espesor de esta capa sufre una gran reducción e incluso puede no producirse dicho fenómeno, debido a las diferencias entre los requerimientos energéticos para la fusión de cada uno de los materiales. Además, se ha visto que existe una diferencia entre las microestructuras que cada uno de estos metales presenta en zonas estables alejadas de las interfases. Mientras que el acero inoxidable tiene una microestructura laminar debido al enfriamiento direccional del proceso, el acero blando presenta una microestructura de granos equiaxiales gracias a una mayor potencia térmica aportada para su fusión que permite un enfriamiento más gradual y homogéneo.

Entre las principales limitaciones de este estudio experimental se encuentra el número reducido de iteraciones realizadas en el análisis iterativo para la determinación del perfil óptimo de

parámetros de fabricación. Si bien se han identificado tendencias claras en la relación entre los parámetros y la porosidad interna en las interfases de la probeta multimaterial, sería necesario un mayor número de ciclos iterativos para alcanzar una convergencia más precisa y robusta hacia un conjunto de parámetros que minimice efectivamente la porosidad y optimice la calidad de la unión entre materiales. Además, la caracterización microestructural mediante microscopía óptica puede limitar la resolución y el nivel de detalle observable en zonas críticas de la interfaz, lo que podría afectar la identificación de defectos submicrométricos. Por otro lado, aunque el análisis mediante microscopía electrónica de barrido proporciona una visión más detallada de la evolución microestructural, la evaluación se ha limitado a zonas representativas, por lo que podrían haberse pasado por alto variaciones microestructurales localizadas. Asimismo, las condiciones experimentales han sido controladas en un entorno específico, lo que podría reducir la generalización de los resultados a otros sistemas multimateriales o a diferentes combinaciones de parámetros de fabricación.

Como proyección futura, se propone ampliar el número de iteraciones en el análisis iterativo de los parámetros de fabricación, con el fin de lograr una optimización más fina y fiable que permita minimizar la porosidad interna en las interfases de forma más consistente. La incorporación de algoritmos de optimización avanzados, como métodos evolutivos o aprendizaje automático, podría facilitar este proceso, reduciendo el tiempo y los recursos requeridos. Asimismo, se sugiere complementar la caracterización microestructural con técnicas de mayor resolución, como la tomografía computarizada de rayos X o la Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), que permitan detectar defectos internos de menor escala y estudiar con mayor profundidad las zonas críticas de la interfaz. Además, futuras investigaciones podrían explorar el efecto de variaciones ambientales o de escalado del proceso en la estabilidad del perfil de parámetros óptimos, así como evaluar la aplicabilidad del enfoque propuesto a diferentes combinaciones de materiales y geometrías más complejas, lo cual permitiría generalizar los resultados obtenidos y aumentar su relevancia industrial.

## 7. CAPÍTULO 3: DEMOSTRADOR DE TIPO INDUSTRIAL

Hasta este punto en el proyecto, todas las piezas que han sido fabricadas mediante el sistema de impresión 3D de tecnología DED estudiado han tenido un formato experimental. Es decir, piezas de dimensiones pequeñas, donde cada una de ellas permite el análisis de una propiedad o capacidad del equipo de impresión por separado, aislando, en la medida de lo posible, del resto de aspectos técnicos del sistema. Sin embargo, la realidad industrial es diferente. Un sistema de fabricación viable debe ser capaz de aunar todas sus características para posibilitar la fabricación de piezas de tipo industrial. Estas se caracterizan por presentar gran complejidad geométrica, así como altos requerimientos a nivel de propiedades mecánicas internas. Además, debido a la alta competitividad que se observa en el sector, el resultado del proceso de fabricación no solo debe ser de alta calidad, sino que también debe suponer cierta viabilidad a escala económica (tiempos y costes de fabricación).

En este capítulo, se pretende llevar a cabo el proceso de fabricación de una pieza propia del sector industrial como es una mangueta de un automóvil de carreras. Todo ello con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema de impresión objeto de estudio a la hora de procesar modelos de esta tipología. Para ello, se presentará su geometría y se adaptará y optimizará de cara a ser compatible con el proceso a aplicar, y se llevarán a cabo las tareas de post-procesado necesarias para corregir la geometría de la pieza. Por último, también se considerarán los aspectos económicos del proceso, en comparación con otros sistemas de fabricación.

### 7.1. METODOLOGÍA

Este apartado tiene como objetivo describir los aspectos metodológicos que se aplicarán para la obtención de las conclusiones sobre la capacidad real de este sistema de fabricación para la producción de piezas de tipo industrial, así como sus ventajas y desventajas en el ámbito económico en comparación con otros sistemas de fabricación. A continuación, la Figura 7.1 presenta la metodología experimental seguida para ello.

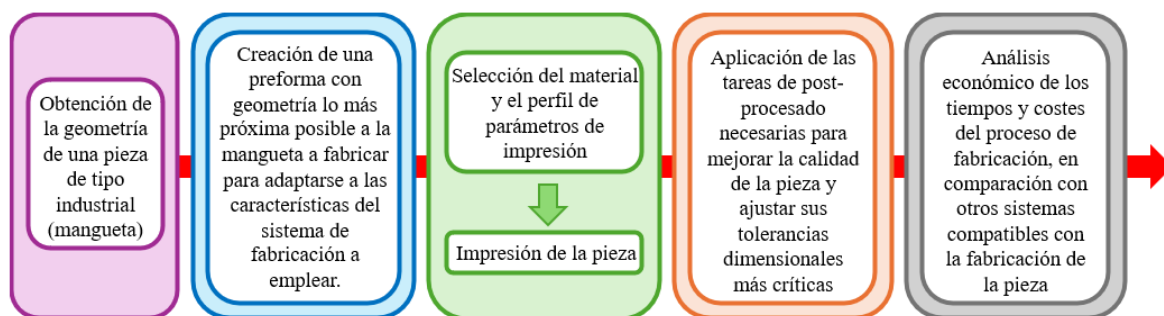


Figura 7.1: Diagrama sobre la metodología aplicada en el Capítulo 3 (Elaboración propia).

En cuanto a la pieza que se fabricará a modo de demostrador de tipo industrial para esta parte del proyecto, se ha elegido emplear la geometría de una mangueta de la dirección de un automóvil de competición de la Fórmula SAE (en concreto, una versión empleada en el último diseño del coche desarrollado por la UPM). Esta pieza es un componente crítico dentro del sistema de dirección y suspensión del vehículo. Su función principal es servir de interfaz entre el conjunto rueda-buje y los sistemas de suspensión y dirección. Se encarga de alojar el buje, permitiendo el giro de la rueda sobre su eje vertical, y transmite las cargas longitudinales, laterales y verticales

desde el neumático hacia la suspensión. Además, actúa como punto de anclaje para los brazos de suspensión y para los componentes del sistema de dirección, como la rótula de dirección. También integra el soporte de las pinzas de freno, permitiendo que las fuerzas de frenado se transfieran correctamente al chasis (Cui et al., 2022).

Por lo tanto, se trata de una pieza cuyas propiedades mecánicas finales son críticas para el correcto funcionamiento del sistema, así como su geometría, que es crítica para la cinemática y la dinámica del vehículo, ya que define parámetros clave como el ángulo de inclinación del eje de dirección, el ángulo de caída y el centro de balanceo de la suspensión (Yadav et al., 2016). La Figura 7.2 muestra la localización de esta pieza dentro del esquema del sistema de dirección y suspensión de un vehículo, mientras que la Figura 7.3 expone la geometría de la que se partirá para el proceso de fabricación.



Figura 7.2: Localización de la mangueta (1) dentro del sistema de suspensión y dirección del vehículo (LaSuspensión, s.f.).



Figura 7.3: Geometría de la mangueta de la que se partirá en esta fase del proyecto (Elaboración propia).

Con el objetivo de adaptar esta geometría a las características del sistema de fabricación DED a emplear, se propone la transformación del modelo original en una preforma con una geometría lo más próxima posible a la geometría a materializar. Esta tecnología, como se ha ido describiendo a lo largo de este proyecto, presenta unos acabados superficiales pobres y una precisión dimensional limitada, dejando cierto sobreespesor en la mayor parte de las dimensiones a materializar. Sin embargo, presenta unas tasas de deposición muy altas y una eficiencia energética elevada; esto, unido a la capacidad del sistema de minimizar la pérdida de material en comparación con las obtenidas de procesos de fabricación más tradicionales, como el mecanizado por arranque de

material, hace que esta forma de abordar el proceso sea la idónea. Mediante la aplicación de la fabricación híbrida se consigue fabricar una preforma con una geometría muy aproximada a la de la mangueta final, con un coste de proceso menor y un mayor rendimiento; mientras que, gracias a la acción de las tareas de mecanizado posteriores a la impresión de las piezas, se consiguen acabados superficiales y un nivel de precisión dimensional propios de los procesos de mecanizado más tradicionales (al conseguir introducir la pieza en tolerancias).

Por otro lado, una vez diseñada la geometría de la preforma a fabricar, se ha de definir los parámetros del perfil de impresión a emplear, así como el resto de aspectos relativos al proceso. Primeramente, cabe mencionar que se aplicará un proceso de impresión multimaterial para la fabricación de esta preforma, fabricando la parte interior en acero blando ("Mild Steel ER70S-6") y la parte exterior en acero inoxidable ("Stainless Steel 316L"). Esta modificación del diseño se ha realizado únicamente con fines experimentales, para comprobar que el proceso de impresión multimaterial es compatible con la fabricación de piezas de tipo industrial. Según la aplicación que tiene la mangueta dentro del funcionamiento del sistema de dirección del vehículo, esta modificación no presenta ninguna ventaja, pero sí que podría suponer un factor diferencial para piezas que se empleen en otros sectores, como el de transporte de fluidos o piezas que requieran de propiedades distintas en diversas zonas de la pieza, manteniendo el carácter enterizo de la pieza y sin que se vean afectadas sus propiedades mecánicas en la región de la unión entre materiales. Además, para el diseño de la preforma de la mangueta se ha priorizado el hecho de que no se necesite ningún tipo de estructura de soporte para poder materializar la pieza correctamente, por lo que este aspecto no se tendrá en cuenta en la determinación del perfil de impresión del proceso. Por último, cabe mencionar que la preforma se ha diseñado a escala 1:2, para evitar un gasto excesivo de material en una pieza que no tendrá aplicación real. El diseño de la preforma de la mangueta a materializar se expone en la Figura 7.4.

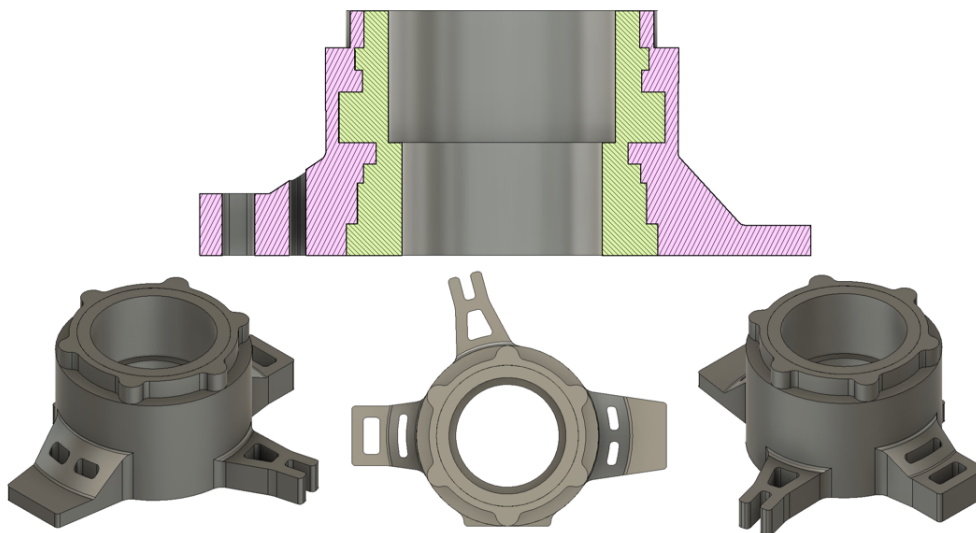


Figura 7.4: Diseño de la geometría de la preforma a fabricar (Elaboración propia).

En cuanto a los aspectos que determinan el proceso de impresión, se ha elegido una plataforma de impresión de tamaño grande (200x150mm) para evitar concentraciones excesivas de calor que produzcan la deformación de la pieza o, incluso, de la propia plataforma de trabajo. Además, como perfiles de impresión se han empleado los perfiles predefinidos por el fabricante de tipo "Verified Density" para ambos materiales, introduciendo sobre ellos las modificaciones concluidas como óptimas para operaciones de tipo multimaterial tras el proceso iterativo del capítulo anterior.

## 7.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por consiguiente, se fabricará una preforma mediante el perfil de parámetros expuesto anteriormente y, ya que el objetivo es poder aplicar un sistema de fabricación híbrido, tras la impresión esta pasará por una serie de operaciones de mecanizado en torno y fresa. Estas alcanzarán la geometría final de la mangueta partiendo de la preforma, meterán las dimensiones más restrictivas de la pieza dentro de su margen de tolerancia, taladrarán y roscarán todos los agujeros necesarios según el diseño de la mangueta original y mejorarán el acabado superficial de las superficies críticas de la pieza. La mangueta resultante de todas estas operaciones se expone en la Figura 7.5.



Figura 7.5: Mangueta obtenida de la preforma DED a partir de operaciones de mecanizado en sistema de fabricación híbrida (Elaboración propia).

Como se puede observar en la imagen superior, no se ha podido llevar a cabo la deposición completa de todo el cuerpo de la pieza. A partir de aproximadamente la mitad de la pieza (capa 50, correspondiente a una altura de la pieza de aproximadamente 400 mm), se puede ver cómo existe un poro de grandes dimensiones, expuesto en la Figura 7.6, generado por la ausencia de fusión en varias de las trayectorias realizadas por el cabezal de impresión. Tras varios intentos, siempre se ha llegado a una situación en la que existía este mismo error a una altura similar, que impedía que se continuara el proceso de impresión. Pese a ello, luego se llevaron a cabo las operaciones de mecanizado que eran viables con la altura de capa que se había alcanzado (mecanizado de la superficie inferior y superior, y mecanizado interior de las capas superiores). Actualmente, se sigue trabajando con el objetivo de solucionar esta problemática, centrándose en un estudio de las trayectorias realizadas por la máquina en las capas próximas a donde se produce el error, ya que existen zonas donde el sistema comienza a realizar trayectorias imprimiendo en el aire (comienza imprimiendo correctamente con acero inoxidable y se produce dicho fallo cuando se cambia el material). A pesar de la aparición de este defecto recurrente, los resultados obtenidos pueden considerarse prometedores. Se ha logrado un modelado muy aproximado de la geometría

de la parte inferior de la pieza, lo que demuestra la viabilidad del proceso en esa zona crítica. Además, se ha conseguido implementar con éxito la fabricación multimaterial, validando así la capacidad de la tecnología para integrar diferentes materiales en una misma pieza.

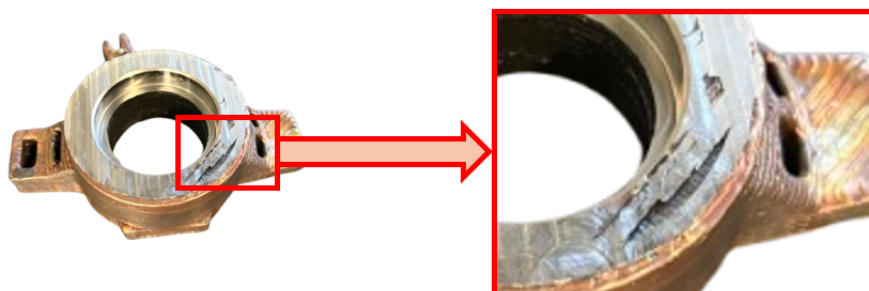


Figura 7.6: Defecto por falta de fusión en capas intermedias del modelo, que ha paralizado el proceso de impresión (Elaboración propia).

Para concluir este capítulo, se ha llevado a cabo una comparación básica en cuanto a los tiempos y costes de fabricación que supondría la fabricación completa de esta pieza en un sistema DED empleando un planteamiento híbrido uniendo fabricación aditiva y operaciones de mecanizado por arranque de viruta, en comparación con los resultados que se obtendrían al realizar este proceso empleando solamente operaciones de mecanizado, que es como se ha venido fabricando este componente de forma tradicional y como se sigue fabricando actualmente en la industria. Este análisis abordará cuatro aspectos clave dentro del proceso: coste del material de partida (materia prima o filamento empleado en la preforma), porcentaje de material desechado en forma de viruta en las operaciones de mecanizado, coste asociado a dicho material desperdiciado y tiempo de fabricación (basado en una estimación a partir del programa CNC de mecanizado, al no disponer de la pieza completa). No se tendrá en cuenta el coste del operario para no aumentar la complejidad de la comparativa, pero cabe mencionar que la atención que requiere el sistema DED es inferior a la que puede requerir la fabricación de una pieza en un centro de mecanizado CNC. Tampoco se contemplará el coste del propio equipo de fabricación. Cabe mencionar que se diferenciará entre el coste de la materia prima empleada para las operaciones de mecanizado (tocho de acero) y el coste del filamento empleado en las tareas de impresión DED para aumentar la veracidad y la representatividad de los resultados con respecto a la realidad industrial. Los resultados de esta comparativa se exponen en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Comparativa de costes y tiempos de fabricación entre ambos sistemas considerados.

	Material de partida	% Material desechado	Coste asociado	Tiempo efectivo
Fabricación Híbrida (DED + Mecanizado)	Filamento acero inoxidable 316L y acero blando ER70S (233.78€)	15.80 %	36.94€	8 + 6 horas
Fabricación Tradicional por Mecanizado	Redondo macizo acero inoxidable 316L - 250mm diámetro y 100 mm altura (464.13€)	72.40 %	336.03€	8 horas

### 7.3. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Como conclusión, la fabricación de la mangueta del sistema de dirección mediante un proceso híbrido, que combina la creación de una preforma mediante tecnología DED y posteriores operaciones de mecanizado, ha demostrado ser una alternativa eficiente y viable frente a los métodos tradicionales. Durante el proceso se detectó un defecto recurrente en las capas superiores que impidió la deposición completa de la pieza, lo que pone de manifiesto la necesidad de seguir optimizando los parámetros de impresión y las trayectorias en dichas zonas. No obstante, los resultados obtenidos son prometedores: se logró un modelado muy aproximado de la parte inferior de la pieza y se implementó con éxito la estrategia de impresión multimaterial, lo que permitiría adaptar las propiedades del componente a sus exigencias funcionales. Además, el análisis comparativo con procesos de fabricación convencionales ha evidenciado claras ventajas del enfoque híbrido, destacando una significativa reducción en el desperdicio de material y un menor coste asociado a dicho desperdicio. Estos hallazgos posicionan a la fabricación híbrida como una solución competitiva y sostenible para componentes industriales complejos.

A pesar de los resultados prometedores obtenidos, es importante señalar que el análisis realizado presenta ciertas limitaciones derivadas de su carácter fundamental y exploratorio. Uno de los principales inconvenientes detectados fue la aparición recurrente de un defecto en las capas superiores de la pieza, que impidió completar la deposición de todo el componente. Esta circunstancia limita la evaluación global del proceso y pone de manifiesto la necesidad de continuar trabajando en la optimización de las trayectorias de impresión. Además, el estudio se ha centrado en una única geometría y configuración de materiales, lo que restringe la generalización de las conclusiones a otros tipos de componentes o combinaciones multimaterial. Por otro lado, el alcance del análisis comparativo se ha limitado a aspectos básicos como coste, tiempo y desperdicio de material, sin abordar en profundidad factores como la integridad metalúrgica, la resistencia a la fatiga o el comportamiento a largo plazo bajo condiciones reales de operación.

De cara a futuras investigaciones, resulta prioritario abordar la optimización de los parámetros del proceso DED y de las trayectorias de impresión en las zonas críticas, con el fin de evitar la aparición del defecto observado y garantizar la fabricación íntegra de la pieza. Asimismo, sería de gran interés ampliar el estudio a una mayor variedad de geometrías y configuraciones multimaterial, lo que permitiría evaluar la versatilidad del proceso híbrido en distintos contextos industriales. También se propone realizar ensayos más exhaustivos sobre las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las piezas fabricadas, incluyendo análisis de microestructura, resistencia a la fatiga y comportamiento en condiciones de servicio. Finalmente, la integración de herramientas de simulación y de análisis de ciclo de vida contribuiría a consolidar la viabilidad técnica, económica y ambiental de esta tecnología como una alternativa real frente a los procesos tradicionales.

## 8. PLANIFICACIÓN TEMPORAL

En este capítulo se describe la estrategia temporal adoptada durante el desarrollo del proyecto, abarcando tanto la planificación como la gestión de las tareas. Se introduce la Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP), que permite organizar y administrar eficazmente el tiempo asignado a cada actividad. La planificación completa de las tareas se representa en la Figura 8.1 y se detalla en el Diagrama de Gantt mostrado en la Figura 8.2 (listado de tareas en la Tabla 8.1).

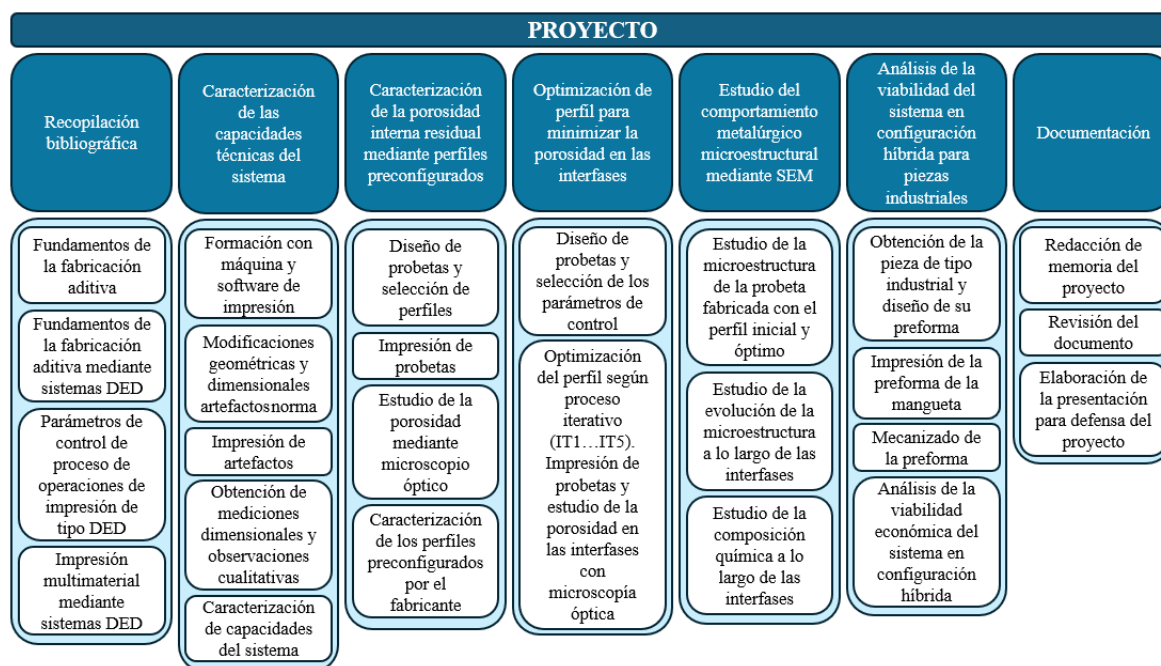


Figura 8.1: Diagrama tipo Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP) (Elaboración propia).

Tabla 8.1: Descomposición de tareas del proyecto.

NOMBRE DE LA TAREA	DURACIÓN DÍAS	FECHA INICIO	FECHA FIN
<b>Recopilación bibliográfica</b>			
- Fabricación aditiva	5	10/01/25	14/01/25
- Sistemas de fabricación DED	5	15/01/25	19/01/25
- Parámetros de control en procesos DED	10	20/01/25	29/01/25
- Impresión multimaterial en sistemas DED	10	30/01/25	08/02/25
<b>Caracterización de las capacidades del sistema</b>			
- Formación con máquina y software de impresión	5	09/02/25	13/02/25
- Modificación de los artefactos de la norma	5	14/02/25	18/02/25
- Impresión de artefactos	6	16/02/25	21/02/25
- Medidas dimensionales y cualitativas	3	20/02/25	22/02/25
- Conclusión sobre capacidades del sistema	2	23/02/25	24/02/25
<b>Caracterización de perfiles preconfigurados</b>			
- Diseño de probetas y selección de perfiles	2	25/02/25	26/02/25
- Impresión de probetas monomaterial	20	27/02/25	18/03/25
- Estudio porosidad mediante microscopio óptico	15	25/04/25	09/05/25
- Conclusiones sobre propiedades finales	3	10/05/25	12/05/25
<b>Optimización perfil de impresión multimaterial</b>			
- Diseño de probetas y selección de parámetros	12	19/03/25	30/03/25
- Proceso iterativo de optimización (IT1...IT5)	65	01/04/25	04/06/25
<b>Estudio del comportamiento microestructural</b>			
- Estudio de la microestructura de varias probetas	4	05/06/25	08/06/25
- Estudio microestructural a lo largo de la interfase	4	09/06/25	12/06/25
- Estudio de la composición química en la interfase	2	13/06/25	14/06/25
<b>Viabilidad de la configuración híbrida</b>			
- Diseño de preforma de mangueta	10	22/05/25	31/05/25
- Impresión de la preforma	40	01/06/25	10/07/25
- Mecanizado de la preforma	5	11/07/25	15/07/25
- Análisis de la viabilidad económica del sistema	5	16/07/25	20/07/25
<b>Documentación</b>			
- Redacción de memoria del proyecto	198	15/01/25	31/07/25
- Revisión del documento	20	01/08/25	20/08/25
- Elaboración de presentación para defensa	10	21/08/25	01/09/25
<b>PROYECTO</b>	<b>235</b>	<b>10/01/25</b>	<b>01/09/25</b>

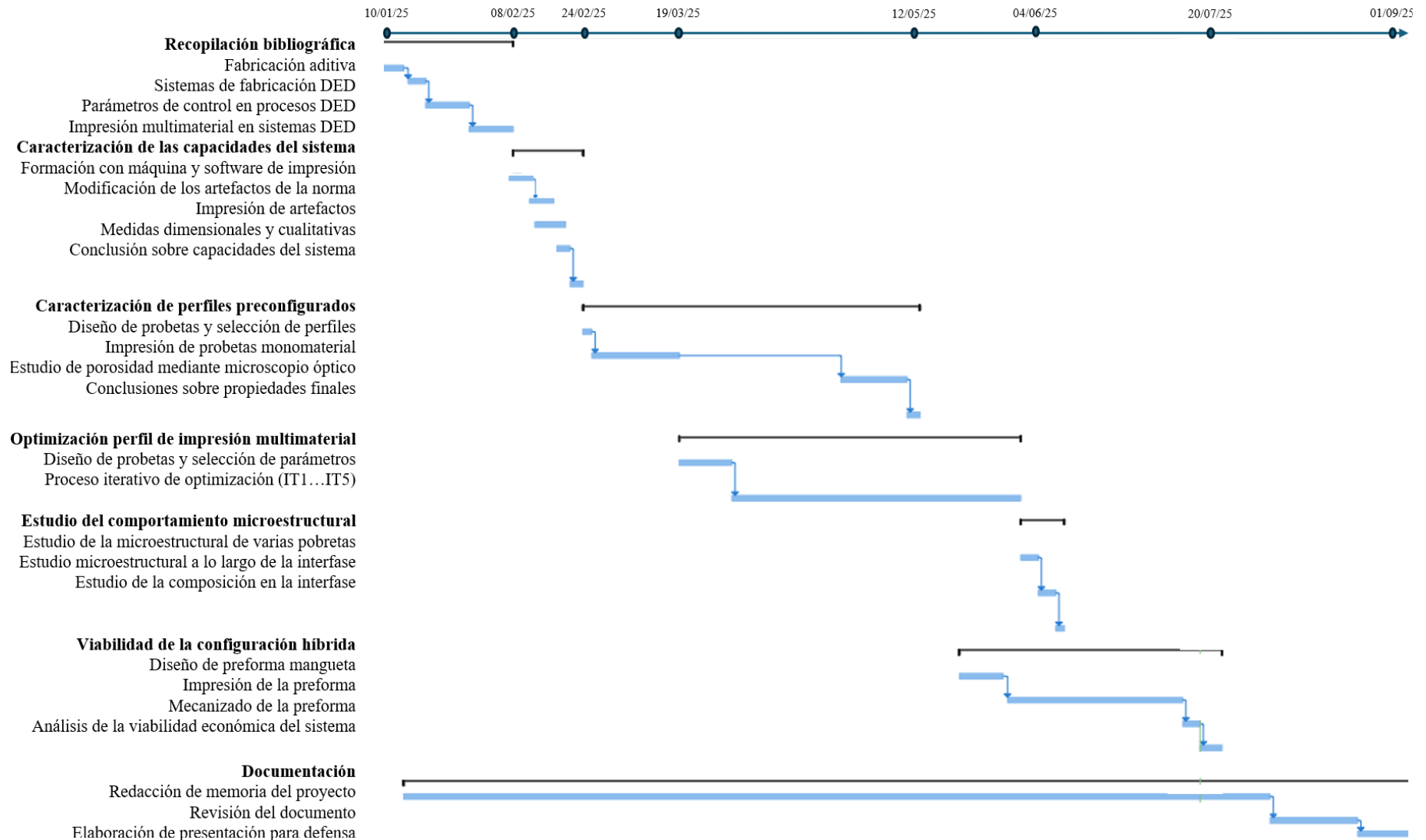


Figura 8.2: Diagrama de Gantt del proyecto (Elaboración propia).

## 9. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este capítulo se presentan los cálculos realizados para la elaboración del presupuesto general del proyecto. Se contemplan los gastos de personal, la amortización de equipos inventariables y fungibles, así como los costes asociados a licencias.

### 9.1. PRESUPUESTO GENERAL

La Tabla 9.1 presenta el presupuesto general del proyecto, basado en una estimación de 1.750 horas anuales de trabajo.

Tabla 9.1: Presupuesto general del proyecto.

<b>Partidas Presupuesto</b>	<b>Coste Imputable</b>	<b>Descripción</b>
Gastos de Personal	12600 €	Ingeniero Junior y Dirección el Proyecto
Gastos en Amortización de Equipos	984.29 €	Coste relativo a la amortización de los equipos registrados
Gastos en Fungibles	1220 €	Coste relativo a materiales y productos consumibles
Gastos en Licencias de Software	787 €	Coste de Licencias
Base Disponible	15591.29 €	Presupuesto General sin IVA
<b>Total</b>	<b>18865.46 €</b>	<b>IVA 21 %</b>

A continuación, se detallan cada una de las partidas incluidas en este presupuesto.

### 9.2. GASTOS DE PERSONAL

Tabla 9.2: Partida para gastos de personal.

<b>Concepto</b>	<b>Horas</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Coste</b>
Ingeniero Junior	480 h	20 €/h	9600 €
Ingeniero Senior (Dirección de Proyecto)	50 h	30 €/h	1500 €
Ingeniero Senior (Dirección de Proyecto)	50 h	30 €/h	1500 €
<b>Total</b>			<b>12600 €</b>

## 9.3. GASTOS EN AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS

Tabla 9.3: Partida para gastos en amortización de equipos.

Concepto	Horas Uso	Coste Adquisición	Vida Útil	Coste
Ordenador Personal	600 h	800 €	5 años	54.86 €
Ordenador Departamento	100 h	1300 €	5 años	14.86 €
Sistema Meltio M450 (Chiller y Software Incluidos)	80 h	160000 €	10 años	731.43 €
Sistema de Calibración Láser	30 h	3000 €	10 años	5.14 €
Pulidora Manual	15 h	3000 €	10 años	2.57 €
Microscopio Óptico (Cámara Digital y Software Incluidos)	20 h	16000 €	10 años	18.29 €
Microscopio Electrónico de Barrido (Sistema EDS y Software Incluidos)	5 h	550000 €	10 años	157.14 €
<b>Total</b>				<b>984.29 €</b>

## 9.4. GASTOS EN FUNGIBLES

Tabla 9.4: Partida para gastos en fungibles.

Concepto	Coste Imputable	Descripción
Filamentos Metálicos	220 €	Filamentos comerciales de acero inoxidable y acero blando para la impresión de las probetas
Argón	150 €	Gas necesario para la inertización de la cámara de impresión del sistema
Plataformas Impresión	400 €	Fabricación de plataformas de impresión a partir de placas de acero inoxidable
Material Laboratorio	250 €	Útiles desechables y productos químicos empleados en las tareas realizadas en el laboratorio de metalografía
Operaciones Mecanizado	200 €	Operaciones de separación de las piezas de las plataformas de impresión, desbaste y rectificado de estas y mecanizado de la preforma de mangueta
<b>Total</b>	<b>1220 €</b>	

## 9.5. LICENCIAS DE SOFTWARE

Tabla 9.5: Partida para gastos en licencias de software.

Concepto	Coste Imputable	Descripción
Licencia Microsoft 365	30 €	Licencia anual
Licencia Fusion 360	757 €	Licencia anual
<b>Total</b>	<b>787 €</b>	

## 10. EVALUACIÓN DE IMPACTOS Y CONTRIBUCIÓN A ODS

En este apartado se pretende realizar una evaluación de la influencia del trabajo desarrollado durante este proyecto en torno a los distintos impactos a nivel tecnológico, industrial, académico y científico, medioambiental y social. Además, también se presenta un análisis de la contribución del trabajo desempeñado a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

### 10.1. EVALUACIÓN DE IMPACTOS

El presente trabajo se centra en el análisis y la caracterización de los sistemas de fabricación aditiva tipo DED mediante el uso de láser y alimentación por filamento metálico, una tecnología emergente que presenta un gran potencial para la producción de componentes metálicos avanzados, especialmente en aplicaciones multimaterial e híbridas. A lo largo del desarrollo del proyecto, se han identificado diferentes impactos que este tipo de investigación y aplicación pueden tener en diversos ámbitos.

- **Impacto tecnológico:** El desarrollo de este proyecto contribuye a mejorar el conocimiento sobre los parámetros de proceso que influyen en la calidad interna de las piezas fabricadas, en especial en lo relativo a la porosidad y la integridad de las interfases en piezas multimaterial. Esto tiene un impacto directo en la mejora de las prestaciones mecánicas y en la fiabilidad de componentes fabricados por DED, favoreciendo su adopción en sectores industriales exigentes como el aeronáutico o el biomédico.
- **Impacto industrial:** El estudio realizado proporciona una base experimental para la optimización de perfiles de fabricación, lo que puede traducirse en una mayor eficiencia de los procesos productivos. La fabricación de una pieza con geometría industrial mediante un enfoque híbrido (impresión aditiva más operaciones de mecanizado) demuestra la viabilidad de integrar esta tecnología en entornos industriales reales, generando valor añadido frente a procesos tradicionales.
- **Impacto académico y científico:** Este trabajo ofrece una aproximación metodológica para la caracterización de procesos DED en base a normativas técnicas y al uso de microscopía óptica y electrónica (SEM), lo que puede servir de referencia para futuras investigaciones. Además, contribuye al desarrollo de estrategias de fabricación multimaterial optimizadas, aún escasamente exploradas, lo que amplía las fronteras del conocimiento en fabricación aditiva.
- **Impacto medioambiental:** Aunque el proyecto no aborda de forma directa el análisis ambiental, la fabricación aditiva tipo DED con alimentación por hilo presenta ciertas ventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad. Al permitir una fabricación 'net shape' o 'near net shape', se reduce el consumo de material y la generación de residuos, en comparación con técnicas de mecanizado tradicionales. El enfoque híbrido desarrollado podría asimismo minimizar el tiempo de fabricación y el desperdicio de recursos.
- **Impacto social:** El avance en tecnologías de fabricación aditiva multimaterial puede repercutir en la creación de nuevos perfiles profesionales y en la transformación de los procesos productivos actuales, aumentando la competitividad de las empresas que adopten este tipo de soluciones. A largo plazo, este tipo de tecnologías puede influir positivamente en la disponibilidad de componentes personalizados y de alto rendimiento en sectores estratégicos.

En conjunto, el proyecto presenta un impacto positivo y transversal en diferentes áreas clave, contribuyendo tanto al avance del conocimiento como a la mejora de los procesos productivos. La combinación de técnicas de caracterización, optimización de parámetros y validación industrial refuerza el potencial transformador de la fabricación aditiva tipo DED, posicionándola como una alternativa viable y sostenible dentro del panorama tecnológico actual.

### 10.2. CONTRIBUCIÓN A LOS ODS

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por todos los Estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), plantea 17 objetivos globales que buscan erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos (Naciones Unidas (ONU), 2015). En este contexto, los avances en ciencia y tecnología desempeñan un papel fundamental como catalizadores del cambio hacia modelos de producción más sostenibles, eficientes e inclusivos. El presente trabajo, centrado en la caracterización y optimización de sistemas de fabricación aditiva tipo DED mediante láser alimentado por filamento metálico, se alinea con esta visión al proponer soluciones innovadoras para transformar los procesos industriales tradicionales. A través de la investigación experimental, la aplicación de normativas técnicas y el desarrollo de una estrategia de fabricación híbrida, se promueve la sostenibilidad tanto en el ámbito productivo como en el formativo y científico. A continuación, se identifican algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible a los que este proyecto contribuye directamente.

- **ODS nº4: Educación de calidad.** El enfoque metodológico y experimental del trabajo, basado en normativa técnica y técnicas de caracterización avanzadas (microscopía óptica y SEM), constituye un aporte valioso al entorno académico. Facilita la formación técnica de calidad en tecnologías emergentes, fomentando la capacitación de profesionales altamente cualificados.
- **ODS nº8: Trabajo decente y crecimiento económico.** La implementación y desarrollo de tecnologías avanzadas como el DED puede impulsar nuevos modelos de empleo cualificado en sectores de alta tecnología. Este proyecto promueve un entorno de trabajo basado en la innovación, la mejora continua y la generación de oportunidades en sectores industriales con alto valor añadido.
- **ODS nº9: Industria, innovación e infraestructura.** Este trabajo promueve la adopción de tecnologías de fabricación avanzada como el DED, reforzando la innovación industrial y contribuyendo al desarrollo de infraestructuras de producción más modernas, inteligentes y sostenibles. Se potencia la fabricación de piezas complejas y multimateriales, habilitando soluciones que podrían aplicarse en sectores estratégicos.
- **ODS nº12: Producción y consumo responsables.** La fabricación aditiva permite una utilización más eficiente de los materiales, reduciendo significativamente el desperdicio asociado a los procesos de mecanizado tradicionales. Este proyecto, al buscar la optimización de parámetros de proceso y la mejora de la calidad de las piezas, contribuye a una gestión más racional y sostenible de los recursos.
- **ODS nº13: Acción por el clima.** Si bien no se aborda directamente la dimensión ambiental, el uso de fabricación aditiva como alternativa a procesos tradicionales intensivos en energía y materiales puede contribuir a mitigar el impacto ambiental. La mejora de la eficiencia y la reducción del material desechado son pasos relevantes hacia la descarbonización del sector industrial.

- **ODS nº17: Alianzas para lograr los objetivos.** El proyecto se apoya en la colaboración entre distintos actores del entorno académico, industrial y tecnológico. Esta interacción multidisciplinar y multientidad favorece el intercambio de conocimiento, la transferencia de tecnología y la creación de sinergias clave para el avance hacia un desarrollo industrial sostenible.

Este trabajo no solo aporta conocimientos técnicos aplicables a la fabricación aditiva, sino que se enmarca dentro de una visión global de sostenibilidad, innovación y desarrollo responsable. Su contribución a los ODS seleccionados refleja el potencial transformador de la investigación tecnológica cuando se orienta hacia la mejora de los procesos industriales, el fortalecimiento de alianzas y la formación de una sociedad más preparada y comprometida con los retos del futuro.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ahn, D.-G. (2021). «Directed energy deposition (DED) process: state of the art». En: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 8.2, págs. 703-742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>.
- Ahsan, M. N., Bradley, R. y Pinkerton, A. J. (2011). «Microcomputed tomography analysis of intralayer porosity generation in laser direct metal deposition and its causes». En: *Journal of laser applications* 23.2. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.3582311>.
- Alimardani, M., Toyserkani, E., Huissoon, J. P. y Paul, C. P. (2009). «On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process: An experimental–numerical investigation». En: *Optics and Lasers in Engineering* 47.11, págs. 1160-1168. ISSN: 0143-8166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.06.010>.
- ASTM-F3187-16 (2016). *Standard guide for directed energy deposition of metals*. Standard. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Attaran, M. (2017). «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing». En: *Business Horizons* 60.5, págs. 677-688. ISSN: 0007-6813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.
- Aversa, A., Saboori, A., Librera, E., de Chirico, M. y Biamino, S. (2020). «The role of Directed Energy Deposition atmosphere mode on the microstructure and mechanical properties of 316L samples». En: *Additive Manufacturing* 34, pág. 101274. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101274>.
- Bader, C., Kolb, D., Weaver, J. C., Sharma, S. y Hosny, A. (2018). «Making data matter: Voxel printing for the digital fabrication of data across scales and domains». En: *Science advances* 4.5, eaas8652. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas8652>.
- Badoniya, P., Srivastava, M., Jain, P. K. y Rathee, S. (2024). «A state-of-the-art review on metal additive manufacturing: milestones, trends, challenges and perspectives». En: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 46.6, págs. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-024-04917-8>.
- Barragan, G., Rojas Perilla, D. A., Grass Nunez, J., Mariani, F. y Coelho, R. (2021). «Characterization and optimization of process parameters for directed energy deposition powder-fed laser system». En: *Journal of Materials Engineering and Performance* 30.7, págs. 5297-5306. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05762-9>.
- Cao, Q., Qi, B., Zeng, C., Yang, Q. y Jiang, Z. (2024). «Wire-Arc Directed Energy Deposition of Magnesium Alloys: Defects, Macro- and Micro-Structure, and Mechanical Performance». En: *Additive Manufacturing Frontiers* 3.4, pág. 200166. ISSN: 2950-4317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200166>.
- Chekkaramkodi, D., Jacob, L., Shebeeb, M. C., Umer, R. y Butt, H. (2024). «Review of vat photopolymerization 3D printing of photonic devices». En: *Additive Manufacturing* 86, pág. 104189. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104189>.

- Costello, S. C., Cunningham, C. R., Xu, F. y Shokrani, A. (2023). «The state-of-the-art of wire arc directed energy deposition (WA-DED) as an additive manufacturing process for large metallic component manufacture». En: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 36.3, págs. 469-510. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2162597>.
- Cui, T., Li, Y., Luo, F. y Wang, C. (2022). «Fracture mechanism of transmission spindle system for high-speed tracked vehicle». En: *Engineering Failure Analysis* 136, pág. 106174. ISSN: 1350-6307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106174>.
- Das, T., Mukherjee, M., Chatterjee, D., Samanta, S. K. y Lohar, A. K. (2023). «A comparative evaluation of the microstructural characteristics of L-DED and W-DED processed 316L stainless steel». En: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 40, págs. 114-128. ISSN: 1755-5817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.010>.
- Dass, A. y Moridi, A. (2019). «State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design». En: *Coatings* 9.7, pág. 418. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>.
- DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J., Mukherjee, T. y Elmer, J. (2018). «Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties». En: *Progress in Materials Science* 92, págs. 112-224. ISSN: 0079-6425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- Dechet, M. A., Gómez-Bonilla, J. S., Grünwald, M. y Popp, K. (2021). «A novel, precipitated polybutylene terephthalate feedstock material for powder bed fusion of polymers (PBF): Material development and initial PBF processability». En: *Materials and Design* 197, pág. 109265. ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109265>.
- Deckard, C. R. (1988). *Selective laser sintering*. The University of Texas at Austin.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U. y Dolen, M. (2017). «The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0». En: *Procedia Manufacturing* 11. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy, págs. 545-554. ISSN: 2351-9789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.
- Eliasz, N., Foucks, N., Geva, D., Oren, S. y Shriki, N. (2020). «Comparative quality control of titanium alloy Ti-6Al-4V, 17-4 pH stainless steel, and aluminum alloy 4047 either manufactured or repaired by Laser Engineered Net Shaping (LENS)». En: *Materials* 13.18, pág. 4171. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13184171>.
- Era, I. Z., Farahani, M. A., Wuest, T. y Liu, Z. (2023). «Machine learning in Directed Energy Deposition (DED) additive manufacturing: A state-of-the-art review». En: *Manufacturing Letters* 35. 51st SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 51), págs. 689-700. ISSN: 2213-8463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.079>.
- Frazier, W. E. (2014). «Metal additive manufacturing: a review». En: *Journal of Materials Engineering and performance* 23, págs. 1917-1928. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.

- Froend, M., Ventzke, V., Kashaev, N., Klusemann, B. y Enz, J. (2019). «Thermal analysis of wire-based direct energy deposition of Al-Mg using different laser irradiances». En: *Additive Manufacturing* 29, pág. 100800. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100800>.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D. y Ramani, K. (2015). «The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering». En: *Computer-Aided Design* 69, págs. 65-89. ISSN: 0010-4485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- García-Collado, A., Blanco, J., Gupta, M. K. y Dorado-Vicente, R. (2022). «Advances in polymers based Multi-Material Additive-Manufacturing Techniques: State-of-art review on properties and applications». En: *Additive Manufacturing* 50, pág. 102577. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102577>.
- Ghadai, S., Jignasu, A. y Krishnamurthy, A. (2021). «Direct 3D printing of multi-level voxel models». En: *Additive Manufacturing* 40, pág. 101929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101929>.
- Griffith, M., Schlienger, M., Harwell, L., Oliver, M. y Baldwin, M. (1999). «Understanding thermal behavior in the LENS process». En: *Materials and Design* 20.2, págs. 107-113. ISSN: 0261-3069. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00016-3).
- Guo, W., Sun, R., Song, B., Zhu, Y. y Li, F. (2018). «Laser shock peening of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy». En: *Surface and Coatings Technology* 349, págs. 503-510. ISSN: 0257-8972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.020>.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. y Emmelmann, C. (2016). «Additive manufacturing of metals». En: *Acta Materialia* 117, págs. 371-392. ISSN: 1359-6454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.
- Hoffmann, M., Heinrich, L., Paramanathan, M., Fillingim, K. B. y Elwany, A. (2024). «Hybrid additive manufacturing of AISI 316L via asynchronous powder and hot-wire laser directed energy deposition». En: *Journal of Manufacturing Processes* 127, págs. 446-456. ISSN: 1526-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.07.144>.
- Hong, S.-B., Eliaz, N., Sachs, E., Allen, S. y Latanision, R. (2001). «Corrosion behavior of advanced titanium-based alloys made by three-dimensional printing (3DPTM) for biomedical applications». En: *Corrosion Science* 43.9, págs. 1781-1791. ISSN: 0010-938X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00181-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00181-5).
- ISO-52900 (2022). *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. Standard. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO-52902 (2023). *Additive manufacturing — Test Artefacts — Geometric Capability Assessment of Additive Manufacturing Systems*. Standard. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Javidrad, H. y Koc, B. (2025). «Additively manufacturing of functionally graded multi-material parts using directed energy deposition». En: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 61, págs. 588-600. ISSN: 1755-5817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2025.08.001>.

- Kennedy, S. M., Vasanthanathan, A. y Amudhan, K. (2024). «Exploring the frontiers of metal additive manufacturing in orthopaedic implant development». En: *MethodsX* 13, pág. 103056. ISSN: 2215-0161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103056>.
- Khorasani, M., MacDonald, E., Downing, D. y Ghasemi, A. (2024). «Multi Jet Fusion (MJF) of polymeric components: A review of process, properties and opportunities». En: *Additive Manufacturing* 91, pág. 104331. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104331>.
- Kim, F. H., Kim, F. H. y Moylan, S. P. (2018). «Literature review of metal additive manufacturing defects». En: *US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology* ... DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-16>.
- Kim, J. S., Kang, B. J. y Lee, S. W. (2019). «An experimental study on microstructural characteristics and mechanical properties of stainless-steel 316L parts using directed energy deposition (DED) process». En: *Journal of Mechanical Science and Technology* 33.12, págs. 5731-5737. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1116-1>.
- Kobryn, P. y Semiatin, S. (2001). «Mechanical properties of laser-deposited Ti-6Al-4V». En: *2001 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, págs. 179-186. DOI: <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/3261>.
- Kumaran, M. y Ravi, S. (2024). «Influence of hybrid additive manufacturing processes on the microstructure and mechanical properties of maraging steel 1.2709 components with post-processing heat treatments». En: *Materials Letters* 377, pág. 137427. ISSN: 0167-577X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137427>.
- Lalegani-Dezaki, M., Serjouei, A., Zolfagharian, A., Fotouhi, M. y Morad, M. (2022). «A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process». En: *Advanced Powder Materials* 1.4, pág. 100054. ISSN: 2772-834X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054>.
- LaSuspensión (s.f.). «La Suspensión SA». En: *Fecha de acceso: 22 de Mayo de 2025 de* <https://www.lasuspension.com.ar/>.
- Li, G., Odum, K., Yau, C., Soshi, M. y Yamazaki, K. (2021). «High productivity fluence based control of Directed Energy Deposition (DED) part geometry». En: *Journal of Manufacturing Processes* 65, págs. 407-417. ISSN: 1526-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.028>.
- Li, Z., Sui, S., Ma, X., Tan, H. y Zhong, C. (2022). «High deposition rate powder- and wire-based laser directed energy deposition of metallic materials: A review». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 181, pág. 103942. ISSN: 0890-6955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103942>.
- Liu, L., Wang, D., Wang, T. y Han, C. (2025). «Laser additive manufacturing of multimaterials with hierarchical interlocking interface via a flexible scraper-based method». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 205, pág. 104236. ISSN: 0890-6955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104236>.

- Liu, Z., He, B., Lyu, T. y Zou, Y. (2021). «A review on additive manufacturing of titanium alloys for aerospace applications: directed energy deposition and beyond Ti-6Al-4V». En: *Jom* 73, págs. 1804-1818. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04670-6>.
- Lu, X., Lin, X., Chiumenti, M., Cervera, M. y Hu, Y. (2019). «Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by Directed Energy Deposition: Modelling and experimental calibration». En: *Additive Manufacturing* 26, págs. 166-179. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.001>.
- Meltio (2024a). «Meltio Horizon User Manual». En: *Meltio Horizon*.
- (2024b). «Meltio M450 User Manual». En: *Meltio M450*.
- (s.f.). «Printing Parameters And their Effects on Part Density - Applies to Meltio M450 and Meltio Engine». En: *Meltio M450*.
- Menon, N., Sawyer, B. A., Jamieson, C. D., Reutzler, E. W. y Basak, A. (2023). «A Comparison of Microstructure and Microhardness Properties of IN718 Fabricated via Powder-and Wire-Fed Laser-Directed Energy Deposition». En: *Materials* 16.3, pág. 1129. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16031129>.
- Moura, B. y Monteiro, H. (2025). «Current development of the metal additive manufacturing sustainability – A systematic review». En: *Environmental Impact Assessment Review* 112, pág. 107778. ISSN: 0195-9255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107778>.
- Muller, M., Labisch, C.-C., Gerdt, L., Bach, L. y Riede, M. (2023). «Multimaterial direct energy deposition: From three-dimensionally graded components to rapid alloy development for advanced materials». En: *Journal of laser applications* 35.1. DOI: <https://doi.org/10.2351/7.0000788>.
- Naciones Unidas (ONU), O. de las (2015). «Objetivos de Desarrollo Sostenible - Agenda 2030». En: *Fecha de acceso: 04 de Julio de 2025 de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/*.
- Nazir, A., Gokcekaya, O., Md Masum Billah, K., Ertugrul, O. y Jiang, J. (2023). «Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials». En: *Materials and Design* 226, pág. 111661. ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. y Hui, D. (2018). «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges». En: *Composites Part B: Engineering* 143, págs. 172-196. ISSN: 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- Noman, A. A., Shaari, M. S., Mehboob, H. y Azman, A. H. (2025). «Recent advancements in additively manufactured hip implant design using topology optimization technique». En: *Results in Engineering* 25, pág. 103932. ISSN: 2590-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103932>.
- Noori Rahim Abadi, S., Mi, Y., Kislewicz, A., Sikström, F. y Choquet, I. (2023). «Influence of laser-wire interaction on heat and metal transfer in directed energy deposition». En:

*International Journal of Heat and Mass Transfer* 205, pág. 123894. ISSN: 0017-9310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123894>.

Nursyifaulkhair, D., Park, N., Baek, E. R. y Lee, J.-b. (2019). «Effect of process parameters on the formation of lack of fusion in directed energy deposition of Ti-6Al-4V alloy». En: *Journal of Welding and Joining* 37.6, págs. 579-584. DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.6.7>.

Omar, S. y Plucknett, K. (2022). «The influence of DED process parameters and heat-treatment cycle on the microstructure and hardness of AISI D2 tool steel». En: *Journal of Manufacturing Processes* 81, págs. 655-671. ISSN: 1526-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.069>.

Piscopo, G., Atzeni, E., Saboori, A. y Salmi, A. (2022). «An overview of the process mechanisms in the laser powder directed energy deposition». En: *Applied Sciences* 13.1, pág. 117. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13010117>.

Piscopo, G., Salmi, A. y Atzeni, E. (2024). «Investigation of dimensional and geometrical tolerances of laser powder directed energy deposition process». En: *Precision Engineering* 85, págs. 217-225. ISSN: 0141-6359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.10.006>.

Prabhu, A., Vincent, T., Chaudhary, A., Zhang, W. y Babu, S. (2015). «Effect of microstructure and defects on fatigue behaviour of directed energy deposited Ti-6Al-4V». En: *Science and Technology of Welding and Joining* 20.8, págs. 659-669. DOI: <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000050>.

Pratheesh-Kumar, S., Elangovan, S., Mohanraj, R. y Ramakrishna, J. (2021). «Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes». En: *Materials Today: Proceedings* 46. 3rd International Conference on Materials, Manufacturing and Modelling, págs. 7907-7920. ISSN: 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.567>.

Qiu, C., Adkins, N. J. y Attallah, M. M. (2013). «Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V». En: *Materials Science and Engineering: A* 578, págs. 230-239. ISSN: 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.04.099>.

Rasiya, G., Shukla, A. y Saran, K. (2021). «Additive Manufacturing-A Review». En: *Materials Today: Proceedings* 47. International Conference on Advances in Design, Materials and Manufacturing, págs. 6896-6901. ISSN: 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.181>.

Ribeiro, K. S., Mariani, F. E. y Coelho, R. T. (2020). «A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes». En: *Procedia Manufacturing* 48. 48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48, págs. 663-670. ISSN: 2351-9789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.158>.

Saboori, A., Piscopo, G., Lai, M., Salmi, A. y Biamino, S. (2020). «An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition». En: *Materials Science and Engineering: A* 780, pág. 139179. ISSN: 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139179>.

- Shanmugam, V., Babu, K., Kannan, G. y Mensah, R. A. (2024). «The thermal properties of FDM printed polymeric materials: A review». En: *Polymer Degradation and Stability* 228, pág. 110902. ISSN: 0141-3910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2024.110902>.
- Shim, D.-S., Baek, G.-Y., Seo, J.-S., Shin, G.-Y. y Kim, K.-P. (2016). «Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process». En: *Optics and Laser Technology* 86, págs. 69-78. ISSN: 0030-3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.001>.
- Singh, A., Kapil, S. y Das, M. (2020). «A comprehensive review of the methods and mechanisms for powder feedstock handling in directed energy deposition». En: *Additive Manufacturing* 35, pág. 101388. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101388>.
- Singh, S., Mehla, S., Bhargava, S. K. y Ramakrishna, S. (2022). «History and evolution of additive manufacturing». En: *Additive manufacturing for chemical sciences and engineering*. Springer, págs. 19-51.
- Skylar-Scott, M. A., Mueller, J., Visser, C. W. y Lewis, J. A. (2019). «Voxelated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing». En: *Nature* 575.7782, págs. 330-335. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1736-8>.
- Stansbury, J. e Idacavage, M. (2016). «3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities». En: *Dental Materials* 32.1, págs. 54-64. ISSN: 0109-5641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>.
- Stavropoulos, P., Souflas, T. y Bikas, H. (2021). «Hybrid Manufacturing Processes: an experimental machinability investigation of DED produced parts». En: *Procedia CIRP* 101. 9th CIRP Conference on High Performance Cutting, págs. 218-221. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.11.010>.
- Stephan, M., Maier, A., Tangermann-Gerk, K., Frankl, S. y Rühr, M. (2024). «DED-LB/M and in-situ alloying of a Co-Cr alloy with elemental powders: defect formation, microstructure and mechanical properties». En: *Procedia CIRP* 124. 13th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2024], 15-19 September 2024, Fürth, Germany, págs. 239-243. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.108>.
- Stroud, I. y Xirouchakis, P. C. (2000). «STL and extensions». En: *Advances in Engineering Software* 31.2, págs. 83-95. ISSN: 0965-9978. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(99\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(99)00046-0).
- Susan, D., Puskar, J., Brooks, J. y Robino, C. (2006). «Quantitative characterization of porosity in stainless steel LENS powders and deposits». En: *Materials Characterization* 57.1, págs. 36-43. ISSN: 1044-5803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.12.005>.
- Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L. y Bose, S. (2021). «Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications». En: *Materials Today* 49, págs. 271-295. ISSN: 1369-7021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.

- Svetlizky, D., Zheng, B., Buta, T., Zhou, Y. y Golan, O. (2020). «Directed energy deposition of Al 5xxx alloy using Laser Engineered Net Shaping (LENS®)». En: *Materials and Design* 192, pág. 108763. ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108763>.
- Svetlizky, D., Zheng, B., Steinberg, D. M., Schoenung, J. M. y Lavernia, E. J. (2022). «The influence of laser directed energy deposition (DED) processing parameters for Al5083 studied by central composite design». En: *Journal of Materials Research and Technology* 17, págs. 3157-3171. ISSN: 2238-7854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.042>.
- Svetlizky, D., Zheng, B., Vyatskikh, A., Das, M. y Bose, S. (2022). «Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials». En: *Materials Science and Engineering: A* 840, pág. 142967. ISSN: 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142967>.
- Taghizadeh, M. y Zhu, Z. H. (2024). «A comprehensive review on metal laser additive manufacturing in space: Modeling and perspectives». En: *Acta Astronautica* 222, págs. 403-421. ISSN: 0094-5765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.06.027>.
- Touri, M., Kabirian, F., Saadati, M., Ramakrishna, S. y Mozafari, M. (2019). «Additive manufacturing of biomaterials- the evolution of rapid prototyping». En: *Advanced Engineering Materials* 21.2, pág. 1800511.
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A. y Hayward, K. (2021). «Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges». En: *Applied Sciences* 11.3, pág. 1213. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11031213>.
- Wang, Z., Stoica, A. D., Ma, D. y Beese, A. M. (2018). «Stress relaxation in a nickel-base superalloy at elevated temperatures with in situ neutron diffraction characterization: Application to additive manufacturing». En: *Materials Science and Engineering: A* 714, págs. 75-83. ISSN: 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.058>.
- Wohlers, T., Tim, G., Noah, M. y Ian, C. (2016). «History of Additive Manufacturing». En: *Wohlers Report 2016-2022* 2, págs. 1-38. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4474824>.
- Yadav, S., Mishra, R. K., Ansari, V. y Lal, S. B. (2016). «Design and analysis of steering knuckle component». En: *Int. J. Eng. Res* 4.
- Yamaguchi, H., Fergani, O. y Wu, P.-Y. (2017). «Modification using magnetic field-assisted finishing of the surface roughness and residual stress of additively manufactured components». En: *CIRP Annals* 66.1, págs. 305-308. ISSN: 0007-8506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.084>.
- Yao, M., Yao, Z., Yi, C., Moliar, O. y Soloviova, T. (2024). «Microstructure and creep behavior of electron beam directed energy deposited TC11 titanium alloy». En: *Materials Science and Engineering: A* 913, pág. 147020. ISSN: 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147020>.
- Yao, X., Ge, P., Li, J., Wang, Y. y Li, T. (2020). «Controlling the solidification process parameters of direct energy deposition additive manufacturing considering laser and powder properties». En: *Computational Materials Science* 182, pág. 109788. ISSN: 0927-0256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109788>.

- Yi, S., Liu, F., Zhang, J. y Xiong, S. (2004). «Study of the key technologies of LOM for functional metal parts». En: *Journal of Materials Processing Technology* 150.1, págs. 175-181. ISSN: 0924-0136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.035>.
- ZainElabdeen, I. H., Ismail, L., Mohamed, O. F., Khan, K. A. y Schiffer, A. (2024). «Recent advancements in hybrid additive manufacturing of similar and dissimilar metals via laser powder bed fusion». En: *Materials Science and Engineering: A* 909, pág. 146833. ISSN: 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146833>.
- Zhang, F., Zhu, L., Li, Z. y Wang, S. (2021). «The recent development of vat photopolymerization: A review». En: *Additive Manufacturing* 48, pág. 102423. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102423>.
- Zheng, B., Zhou, Y., Smugeresky, J., Schoenung, J. y Lavernia, E. (2008). «Thermal behavior and microstructural evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: Part I. Numerical calculations». En: *Metallurgical and materials transactions A* 39, págs. 2228-2236. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00016-3).
- Zhou, L., Miller, J., Vezza, J. y Mayster, M. (2024). «Additive Manufacturing: A Comprehensive Review». En: *Sensors* 24.9. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s24092668](https://doi.org/10.3390/s24092668).
- Ziaee, M. y Crane, N. B. (2019). «Binder jetting: A review of process, materials, and methods». En: *Additive Manufacturing* 28, págs. 781-801. ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.

## ANEXOS

## A. PRIMER ANEXO

En este anexo se incluyen las tablas que contienen las mediciones realizadas sobre las dimensiones características de cada uno de los artefactos fabricados según la norma ISO 52902:2023 y que permiten establecer una estimación sobre las capacidades técnicas del sistema de fabricación empleado. Cada una de ellas muestra las tres mediciones realizadas para cada dimensión, así como su valor medio (tomado como valor final), el valor teórico de cada una de ellas y la desviación observada. Además, cabe mencionar que se presentan según la codificación propuesta en la Figura 5.4 y se emplearán para la obtención de las gráficas que se exponen en el Apartado 4.2.1.

Tabla A.1: Medidas obtenidas para el artefacto lineal para la calibración del eje X.

Artefacto Lineal (Código A) - Calibración Eje X						
Dim.	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Media (mm)	Teórico (mm)	Desviación (mm)
A1	4,94	4,96	4,89	4,93	2,50	2,43
A2	5,66	5,63	5,66	5,65	5,00	0,65
A3	5,99	6,01	6,01	6,00	5,00	1,00
A4	5,76	5,77	5,80	5,78	5,00	0,78
A5	4,97	4,98	5,01	4,99	2,50	2,49
A6	11,21	11,23	11,22	11,22	12,50	-1,28
A7	9,21	9,22	9,20	9,21	10,00	-0,79
A8	6,36	6,35	6,41	6,37	7,50	-1,13
A9	3,33	3,28	3,33	3,31	5,00	-1,69

Tabla A.2: Medidas obtenidas para el artefacto lineal para la calibración del eje Y.

Artefacto Lineal (Código A) - Calibración Eje Y						
Dim.	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Media (mm)	Teórico (mm)	Desviación (mm)
A1	4,68	4,72	4,71	4,70	2,50	2,20
A2	5,71	5,75	5,69	5,72	5,00	0,72
A3	5,78	5,74	5,79	5,77	5,00	0,77
A4	6,14	6,11	6,19	6,15	5,00	1,15
A5	4,69	4,74	4,70	4,71	2,50	2,21
A6	11,27	11,29	11,31	11,29	12,50	-1,21
A7	9,17	9,22	9,14	9,18	10,00	-0,82
A8	6,21	6,26	6,25	6,24	7,50	-1,26
A9	3,74	3,74	3,70	3,73	5,00	-1,27

Tabla A.3: Medidas obtenidas para el artefacto para la calibración del eje Z.

Artefacto para el Eje Z (Código B)						
Dim.	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Media (mm)	Teórico (mm)	Desviación (mm)
B1	Referencia	Referencia	Referencia	Referencia	Referencia	Referencia
B2	4,40	4,35	4,40	4,38	3,75	0,63
B3	9,98	10,01	9,95	9,98	9,375	0,605
B4	15,32	15,37	15,32	15,34	15,00	0,34
B5	19,18	19,23	19,20	19,20	18,75	0,45
B6	21,78	21,83	21,80	21,80	21,25	0,55
B7	25,12	25,09	25,10	25,10	23,75	1,35
B8	28,96	28,93	28,93	28,94	27,50	1,44
B9	32,31	32,28	32,28	32,29	33,125	-0,835

Tabla A.4: Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de pines.

Artefacto para la Resolución de Pines (Código C)						
Dim.	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Media (mm)	Teórico (mm)	Desviación (mm)
C1	8,91	8,95	8,87	8,91	8,80	0,11
C2	7,02	6,97	7,07	7,02	6,60	0,42
C3	5,30	5,31	5,30	5,30	4,40	0,90
C4	4,30	4,32	4,31	4,31	2,20	2,11
C5	No mat.	No mat.	No mat.	No mat.	1,10	No mat.

Tabla A.5: Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de agujeros.

Artefacto para la Resolución de Agujeros (Código D)						
Dim.	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Media (mm)	Teórico (mm)	Desviación (mm)
D1	7,59	7,57	7,61	7,59	8,80	-1,21
D2	5,13	5,11	5,11	5,12	6,60	-1,48
D3	2,48	2,47	2,53	2,49	4,40	-1,91
D4	No mat.	No mat.	No mat.	No mat.	2,20	No mat.
D5	No mat.	No mat.	No mat.	No mat.	1,10	No mat.

Tabla A.6: Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de nervios.

Artefacto para la Resolución de Nervios (Código E)						
Dim.	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Media (mm)	Teórico (mm)	Desviación (mm)
E1	6,71	6,73	6,68	6,71	6,60	0,11
E2	5,82	5,82	5,87	5,84	5,50	0,34
E3	4,85	4,80	4,82	4,82	4,40	0,42
E4	4,15	4,11	4,15	4,14	3,30	0,84
E5	3,05	3,08	3,08	3,07	2,20	0,87
E6	2,68	2,69	2,69	2,69	1,10	1,59

Tabla A.7: Medidas obtenidas para el artefacto para la resolución de ranuras.

Artefacto para la Resolución de Ranuras (Código F)						
Dim.	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Media (mm)	Teórico (mm)	Desviación (mm)
F1	6,35	6,36	6,38	6,36	6,60	-0,24
F2	5,36	5,38	5,39	5,38	5,50	-0,12
F3	4,21	4,26	4,20	4,22	4,40	-0,18
F4	3,43	3,48	3,41	3,44	3,30	0,14
F5	2,26	2,25	2,27	2,26	2,20	0,06
F6	1,09	1,14	1,05	1,09	1,10	-0,01

## B. SEGUNDO ANEXO

En este anexo se incluyen las imágenes de tipo mapa obtenidas en las direcciones principales (vertical y horizontal) de las probetas para el estudio de los perfiles preconfigurados por el fabricante, que permiten obtener conclusiones sobre su porosidad residual interna. Cada una de ellas muestra, para cada probeta, la imagen correspondiente a su dirección vertical (imagen superior) y su dirección horizontal (imagen inferior), así como su correspondiente escala. Además, cabe mencionar que se han fabricado según la configuración de parámetros expuesta en la Tabla 5.2. Por otro lado, también se exponen las tablas relativas al análisis de la porosidad interna de cada una de las probetas fabricadas en ambas direcciones (mediante el empleo de las imágenes presentadas en este anexo). En ellas se exponen los valores extraídos mediante el software 'ImageJ' para el porcentaje de porosidad observado y el tamaño medio de poro para cada una de las variantes descompuestas (RGB) de cada imagen, así como sus valores medios. Cabe mencionar que esta información se empleará para la obtención de los resultados que se exponen en el Apartado 4.2.2.

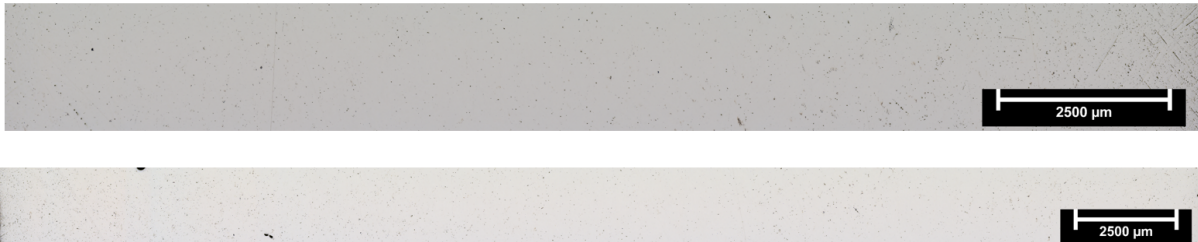


Figura B.1: Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero inoxidable con perfil 'Utility' (Elaboración propia).

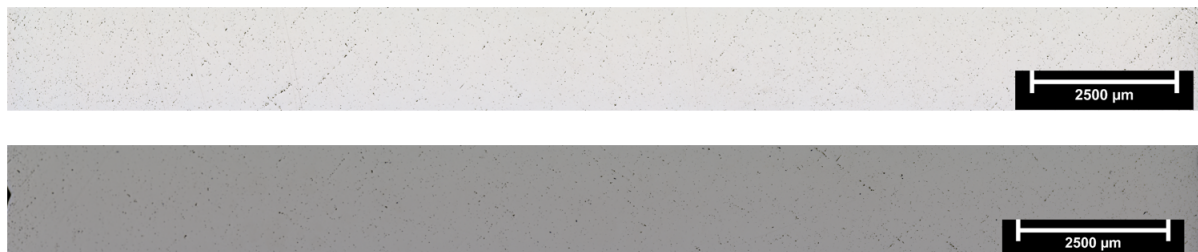


Figura B.2: Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero inoxidable con perfil 'Verified Density' (Elaboración propia).

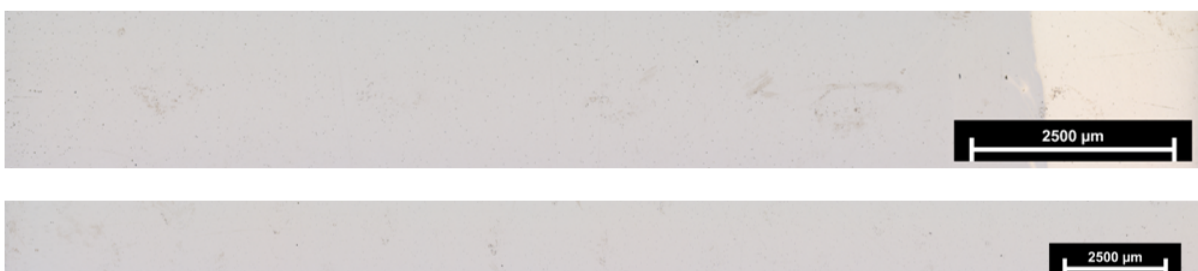


Figura B.3: Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero blando con perfil 'Utility' (Elaboración propia).

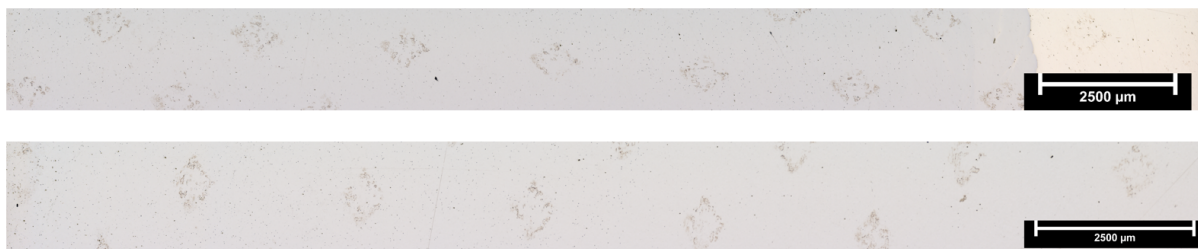


Figura B.4: Mapas obtenidos sobre la superficie de la probeta de acero blando con perfil 'Verified Density' (Elaboración propia).

Tabla B.1: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero inoxidable y perfil 'Utility'.

Material	Perfil Imp.	Dirección	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Ac. Inoxidable	'Utility'	Vertical	R	0.907	0.0356
			G	0.740	0.0288
			B	1.436	0.0773
			Media	1.028	0.0472
Ac. Inoxidable	'Utility'	Horizontal	R	0.695	0.0269
			G	0.721	0.0245
			B	0.857	0.0391
			Media	0.758	0.0302

Tabla B.2: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero inoxidable y perfil 'Verified Density'.

Material	Perfil Imp.	Dirección	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Ac. Inoxidable	'Verified Density'	Vertical	R	0.571	0.0312
			G	0.603	0.0265
			B	0.451	0.0646
			Media	0.542	0.0408
Ac. Inoxidable	'Verified Density'	Horizontal	R	0.984	0.0546
			G	1.067	0.0451
			B	1.167	0.0688
			Media	1.073	0.0562

Tabla B.3: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero blando y perfil 'Utility'.

Material	Perfil Imp.	Dirección	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Ac. Blando	'Utility'	Vertical	R	0.322	0.0169
			G	0.346	0.0138
			B	0.397	0.0306
			Media	0.355	0.0204
Ac. Blando	'Utility'	Horizontal	R	0.319	0.0264
			G	0.396	0.0271
			B	0.507	0.0282
			Media	0.407	0.0272

Tabla B.4: Estudio de la porosidad interna en la probeta fabricada con acero blando y perfil 'Verified Density'.

Material	Perfil Imp.	Dirección	Descomposición	% Porosidad	Tamaño Medio (milímetros)
Ac. Blando	'Verified Density'	Vertical	R	0.519	0.0182
			G	0.649	0.0323
			B	0.695	0.0881
			Media	0.621	0.0462
Ac. Blando	'Verified Density'	Horizontal	R	0.307	0.0354
			G	0.416	0.0363
			B	0.354	0.0788
			Media	0.359	0.0502



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid  
Tel.: 91 336 3060  
[info.industriales@upm.es](mailto:info.industriales@upm.es)

[www.industriales.upm.es](http://www.industriales.upm.es)