

ENTREGABLE 2.2

PROYECTOS—

2024-2025

Estudio de la procesabilidad de cobre y titanio con tecnología PBF-LB/M de láser verde.

“GREENLASER”

Entregable: E2.2. Informe publicable de resultados.

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Número de proyecto: 22400056

Expediente: IMDEEA/2024/49

Duración: 01/06/2024 – 31/11/2025

Coordinado en AIDIMME por: Bloem, Carlos A.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	1
2. EMPRESAS COLABORADORAS	4
2.1. EMPRESA 1: GH INDUCTION.	4
2.2. EMPRESA 2: MECANIZADOS S.A.....	4
2.3. EMPRESA 3: METAL WORLD COMPONENTES S.L.U.	5
2.4. EMPRESA 4: FLUID AND THERMAL MANAGMENT S.L.	6
2.5. EMPRESA 5: UMESAL S.L.....	7
2.6. TABLA-RESUMEN EMPRESAS.....	8
3. ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO	9
3.1. ESTUDIO DE LA PROCESABILIDAD DE POLVO DE COBRE CON TECNOLOGÍA DE LÁSER VERDE (PAQUETE DE TRABAJO 4).....	9
3.1.1. TAREA 4.1. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE OXÍGENO EN EL COBRE.	9
3.1.2. TAREA 4.2. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO.	11
3.1.3. TAREA 4.3. DESARROLLO DE PARÁMETROS DE COBRE CON POLVO FINO Y POLVO GRUESO.	11
3.1.5. TAREA 4.4. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESPESOR DE CAPA EN LA DENSIFICACIÓN DE LAS PIEZAS DE COBRE. 16	
3.1.6. TAREA 4.4. DESARROLLO DE PARÁMETROS DE COBRE CON POLVO FINO Y POLVO GRUESO.	17
3.1.7. TAREA 4.5. DESARROLLO DE DEMOSTRADORES.....	17
3.1.8. CONCLUSIONES PT4.....	18
3.2. ESTUDIO DE LA PROCESABILIDAD DE POLVO DE TITANIO CON TECNOLOGÍA DE LÁSER VERDE (PAQUETE DE TRABAJO 5).....	18
3.2.1. RESUMEN PT5	20
4. CONCLUSIONES GENERALES.....	21
5. BIBLIOGRAFÍA.....	22

1. Introducción, objetivos del proyecto

Tecnología de fusión por láser (PBF.LB/M): Las tecnologías de lecho de polvo basadas en láser están más extendidas en la actualidad que las PBF.EB/M, tecnología de fusión por haz de electrones. Estos equipos utilizan una fuente energética láser para fundir el polvo metálico capa a capa bajo unas condiciones inertes que permiten reducir el nivel de oxígeno durante el proceso. En comparación con la tecnología PBF.EB/M, la tecnología **(PBF.LB/M)** nos permite fabricar piezas con mayor precisión y nivel de detalle, puesto que el polvo utilizado en ésta última tiene una distribución de partículas de un tamaño menor (20-63um) en lugar de (45-105um) utilizado por la PBF.EB/M, por otro lado, el espesor de capa utilizado en **(PBF.LB/M)** es también menor.



Figura 1. Máquinas PBF-LB/M

La mayoría de las piezas que se fabrican por fabricación aditiva FA en la actualidad se fabrican mediante PBF-LB/M, en gran parte debido a su acabado superficial y la gran libertad de diseño.

Este proceso consiste en esparcir una fina capa de polvo sobre la plataforma de construcción y calentar selectivamente las zonas definidas de polvo usando una fuente láser para fundir el polvo, repitiendo este proceso para cada capa posterior de polvo, una a una hasta formar el producto final; se utiliza un láser, lo que resulta en una precisión dimensional muy controlada, esta tecnología se utiliza para piezas medianas y pequeñas [1].

La tecnología PBF-LB/M se utiliza para piezas de mayor complejidad geométrica y por lo general para piezas de pequeñas dimensiones.

Sin embargo, ha sido un desafío poder fabricar piezas de Cu puro con esta tecnología, ya que normalmente emplea un láser infrarrojo con una longitud de onda > 1000 nm. [1] Esto se debe a que la absorptividad de energía del cobre cae significativamente ($<10\%$) a longitudes de onda superiores a los 800 nm. [2] tal como se observa en la figura 2.

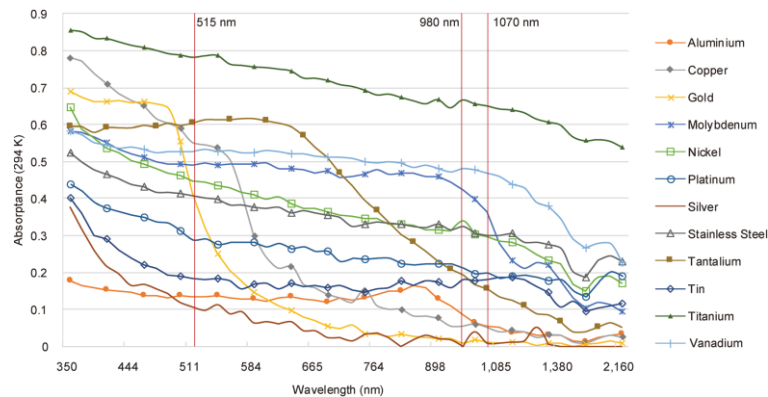


Figura 2. Absortividad de diferentes materiales como una función de la longitud de onda [3]

El desarrollo de nuevas máquinas que **incorporan un láser verde** abre la posibilidad de **procesar cobre puro empleando la tecnología de PBF-LB/M**, tal como lo vaticinan Pan Lu et al [4] que reportan que la ventaja de utilizar un láser verde en lugar de láser infrarrojo para fabricar piezas en cobre puro es que se requiere de una menor potencia y mayores espaciamientos entre líneas de fusión.

Por otro lado, desde el desarrollo del Direct Metal Laser Melting en 1995 por el Instituto Fraunhofer ILT [5], hasta la tecnología que existe en la actualidad, ha habido grandes cambios. Sin embargo, bien por continuismo o por las propias limitaciones del haz de energía, como la potencia o su longitud de onda que influye en la reflectividad del haz sobre el polvo, hasta la fecha se ha empleado principalmente polvo con una granulometría de 20 ~ 50 μm .

A pesar de que el empleo de polvo más grueso presenta varios beneficios, su empleo ha sido escasamente evaluado. La ventaja del empleo de polvo grueso, como lo menciona Habibnejad [6], es la disminución sustancial del índice de inflamabilidad, que junto con la disminución de la relación superficie/volumen hace que sea menos reactivo y, por tanto, disminuye su sensibilidad a la oxidación. Estos aspectos son muy importantes durante el proceso de fabricación, abriendo nuevas alternativas industriales. Además, el polvo más grueso es más económico y, por tanto, más rentable.

Durante el presente proyecto, se pretende **evaluar el comportamiento del polvo convencional, 20 ~ 50 μm (polvo fino), respecto de un polvo más grueso, mayor a 50 μm , (polvo grueso)**. Para ello es necesario desarrollar los parámetros de procesado con láser verde **tanto para geometrías finas como para piezas másicas**, para poder obtener **demostradores con aplicabilidad industrial** para ambos tipos de polvo.

Adicionalmente, a esta evaluación, se pretende evaluar simultáneamente, la **evolución de la oxidación del polvo a lo largo de su reutilización**, con el fin de disminuir el impacto medioambiental al reducir el descarte de polvo tras la fabricación.

En el caso del Ti6Al4V, se pretende poder fabricar piezas con geometrías básicas empleando **polvo más grueso que el convencional**, el empleo del polvo grueso puede permitir reducir los tiempos de fabricación, incrementar el grado de reutilización del polvo por la disminución de la oxidación lo que conlleva a una mejora sustancial en sostenibilidad.

Objetivos:

Los objetivos principales del proyecto se centran en:

- Desarrollo de parámetros para la fabricación de geometrías finas y elementos macizos mediante láser verde en dos diferentes tamaños de polvo de cobre puro 99,95.
- Fabricación de demostradores industriales en Cu con polvo grueso y polvo fino.

Por otro lado, los objetivos específicos son:

- Obtención de los parámetros de fabricación con polvo fino de cobre en piezas tanto de pared fina como elementos másicos con una densidad superior a 98%.
- Obtención de los parámetros de fabricación con polvo grueso de cobre en piezas tanto de pared fina como elementos másicos con una densificación superior al 98%.
- Obtención de los parámetros de fabricación con diferentes espesores de capa con el fin de incrementar la productividad.
- Caracterización microestructural para la determinación del grado de densificación de los experimentales.
- Evaluar el grado de oxidación del polvo de cobre a lo largo de su reutilización en fabricaciones consecutivas.
- Interactuar con las empresas comprometidas en el desarrollo de demostradores de interés industrial de cobre que potencien la aplicabilidad en los procesos industriales en los que ellos se desempeñan.
- Diseminar y difundir las bondades de la PBF-LB/M con láser verde

2. Empresas colaboradoras

Las empresas que han colaborado en el proyecto son:

- GH INDUCTION.
- MECANIZADOS S.A.
- METAL WORLD.
- FLUID AND THERMAL MANAGMENT.
- UMESAL.

2.1. Empresa 1: GH INDUCTION.

GH Induction (perteneciente al grupo GH Electrotermia S.A.U.) es una compañía global especializada en el diseño, fabricación y mantenimiento de soluciones avanzadas para el calentamiento por inducción industrial. Con sede central en Valencia, España, y una trayectoria de más de 60 años desde su fundación en 1961, la empresa se posiciona como uno de los líderes tecnológicos del sector a nivel mundial.

La organización cuenta con una sólida presencia internacional a través de filiales y centros de servicio estratégicamente ubicados en Alemania, Francia, Estados Unidos, México, Brasil, India y China. Esta infraestructura le permite dar soporte a una base instalada de más de 5.000 clientes en diversos sectores industriales de alta exigencia.

Sus principales áreas de especialización incluyen:

Sectores Estratégicos: GH Induction provee sistemas llave en mano para las industrias de automoción (incluyendo movilidad eléctrica), aeroespacial, energías renovables (eólica), naval, ferroviaria e industria médica.

Innovación en Fabricación Aditiva: La empresa es pionera en el desarrollo de la tecnología 3DPCoil, consistente en la fabricación de inductores de cobre mediante impresión 3D. Esta innovación permite optimizar la geometría de las bobinas, aumentando su durabilidad y mejorando la precisión del tratamiento térmico.

Eficiencia Energética: Mediante la integración de generadores de potencia basados en tecnología de carburo de silicio (SiC) y sistemas de simulación por elementos finitos, GH ofrece soluciones que minimizan el consumo energético y eliminan las emisiones directas de CO2 en comparación con los métodos tradicionales de calentamiento por gas.

En la actualidad, GH Induction se distingue por su capacidad de integración vertical, abarcando desde la investigación y desarrollo de fuentes de potencia hasta la ingeniería de sistemas de automatización complejos, consolidándose como un partner estratégico para la descarbonización y digitalización de los procesos térmicos industriales.

2.2. Empresa 2: MECANIZADOS S.A.

Mecanizados S.A. es una empresa especializada en la fabricación de componentes mecánicos de alta precisión mediante procesos de arranque de viruta y tecnologías de mecanizado avanzado.

Con una sólida trayectoria en el sector metalmecánico, la compañía se ha consolidado como un proveedor estratégico para industrias que requieren estándares de calidad rigurosos y tolerancias críticas.

La capacidad operativa de la empresa se fundamenta en la integración de tecnologías de última generación y un enfoque orientado a la ingeniería de procesos. Sus principales pilares de actividad incluyen:

Capacidades Técnicas: La compañía dispone de un parque de maquinaria avanzado que incluye centros de mecanizado CNC de 3, 4 y 5 ejes, tornos de alta precisión y sistemas de rectificado. Esto permite el procesamiento de una amplia gama de materiales, desde aceros aleados y aluminios hasta materiales técnicos como titanio, inoxidable y superaleaciones.

Sectores de Aplicación: Mecanizados S.A. desarrolla componentes críticos para sectores altamente regulados, destacando su participación en la industria de la automoción, aeronáutica, defensa, energía y bienes de equipo. Su versatilidad le permite abordar desde el prototipado rápido hasta la producción de series cortas y medias.

Calidad y Metrología: El compromiso con la excelencia operativa se refleja en sus sistemas de gestión de calidad, apoyados por laboratorios de metrología equipados con máquinas de medición por coordenadas (CMM) y sistemas de inspección óptica. Esto garantiza el cumplimiento de las normativas internacionales y los requisitos específicos de diseño de cada cliente.

Valor Añadido: Más allá del mecanizado convencional, la empresa ofrece servicios de asesoramiento en "Design for Manufacturing" (DfM), optimizando los diseños de los clientes para mejorar la eficiencia productiva y reducir costes, manteniendo siempre la integridad funcional del componente.

En la actualidad, Mecanizados S.A. apuesta por la digitalización industrial y la mejora continua, posicionándose como un referente en fiabilidad, precisión y respuesta ágil ante los desafíos tecnológicos de la industria moderna.

2.3. Empresa 3: METAL WORLD COMPONENTES S.L.U.

Metalworld Componentes SLU es una empresa española especializada en la fabricación de componentes metálicos de alta precisión, con una sólida reputación en el desarrollo de soluciones para sectores industriales que requieren altos estándares estéticos y funcionales. Se destaca por su capacidad de integrar diversos procesos de transformación metálica bajo un enfoque de servicio integral.

La actividad de la compañía se caracteriza por los siguientes pilares operativos:

Procesos de Fabricación: Metalworld Componentes cuenta con una amplia capacidad técnica que incluye procesos de estampación, mecanizado CNC, corte láser y soldadura. Esta versatilidad le permite transformar materias primas en componentes complejos, gestionando tanto piezas únicas como series de producción medias y largas.

Especialización en Acabados Superficiales: Uno de los grandes diferenciadores de la empresa es su experiencia en tratamientos de acabado y pulido. La compañía es reconocida por su capacidad para entregar componentes con acabados de alta calidad, esenciales para sectores donde el diseño y la apariencia externa son tan críticos como la integridad estructural.

Sectores de Aplicación: Si bien su tecnología es aplicable a múltiples industrias, Metalworld tiene una presencia relevante en el sector del mobiliario de diseño, la decoración, el retail y la arquitectura de interiores. Asimismo, su flexibilidad productiva le permite actuar como proveedor estratégico de componentes auxiliares para la industria general y la automoción.

Oficina Técnica y Desarrollo: La empresa colabora estrechamente con sus clientes desde la fase de diseño y prototipado. Su equipo técnico aporta soluciones para optimizar la fabricabilidad de las piezas, asegurando que el paso del concepto a la producción industrial sea eficiente y cumpla con los costes objetivos.

En la actualidad, Metalworld Componentes SLU se posiciona como un partner de referencia para fabricantes que buscan externalizar la producción de piezas metálicas con un alto valor añadido, garantizando calidad en el detalle, cumplimiento de plazos y una gestión ágil de los proyectos.

2.4. Empresa 4: FLUID and THERMAL MANAGMENT S.L.

Fluid and Thermal Management S.L. (FTM) es una compañía de ingeniería y suministro técnico especializada en el diseño y comercialización de soluciones para la gestión de fluidos y sistemas térmicos en entornos industriales de alta exigencia. La empresa destaca por su capacidad para ofrecer asesoramiento experto en aplicaciones críticas donde el control preciso de la temperatura, la presión y el flujo de sustancias es fundamental para la seguridad y eficiencia del proceso.

Los activos principales de la organización incluyen:

Especialización en Sistemas Térmicos: FTM ofrece una amplia gama de intercambiadores de calor (de placas, tubulares y de superficie rascada), sistemas de recuperación de energía y equipos de generación térmica. Su enfoque se centra en maximizar el rendimiento energético y reducir la huella de carbono de los procesos industriales de sus clientes.

Tecnologías de Fluido y Estanqueidad: La compañía actúa como un partner tecnológico en la selección e implementación de sistemas de bombeo, valvulería especializada y soluciones de estanqueidad. Su catálogo integra componentes diseñados para operar con fluidos corrosivos, viscosos o bajo condiciones de presión extremas.

Sectores Clave: Fluid and Thermal Management desarrolla su actividad principalmente en los sectores Químico, Petroquímico, Alimentario, Farmacéutico y Energético. Su experiencia en estos mercados le permite suministrar equipos que cumplen con las normativas internacionales más estrictas, como ASME, API o certificaciones para grado alimentario y farmacéutico.

Ingeniería de Aplicación: Más allá del suministro de componentes, FTM aporta un alto valor

añadido a través de su oficina técnica, realizando cálculos térmicos, dimensionamiento de equipos y estudios de optimización de procesos. Esto asegura que cada solución se adapte específicamente a los parámetros operativos de la planta de destino.

En el mercado actual, Fluid and Thermal Management S.L. se posiciona como un proveedor de confianza que combina el conocimiento técnico de vanguardia con un servicio personalizado, ayudando a las empresas a mejorar la fiabilidad de sus instalaciones y la sostenibilidad de sus operaciones industriales.

2.5. Empresa 5: UMESAL S.L.

UMESAL S.L. es una empresa española especializada en el mecanizado de precisión, la fabricación de grandes estructuras y el montaje de conjuntos mecánicos completos. Con sede en Moncada (Valencia), la compañía cuenta con una trayectoria consolidada en el sector industrial, destacando por su capacidad para gestionar proyectos integrales que abarcan desde el diseño técnico y la adquisición de materiales hasta la entrega del producto terminado y verificado.

Los pilares fundamentales de su actividad son los siguientes:

Capacidades de Mecanizado y Gran Tamaño: UMESAL dispone de un parque tecnológico avanzado que incluye centros de mecanizado CNC, tornos de gran capacidad y fresadoras puente de grandes dimensiones. Esta infraestructura le permite abordar tanto piezas de precisión micrométrica como componentes de gran tonelaje y envergadura, una capacidad que la distingue de los talleres de mecanizado convencional.

Fabricación de Utillajes y Maquinaria: La empresa es especialista en el diseño y construcción de utillajes complejos, herramientas de control y maquinaria a medida. Su oficina técnica trabaja en estrecha colaboración con los departamentos de ingeniería de sus clientes para desarrollar soluciones que optimicen las líneas de producción y el ensamblaje industrial.

Sectores Estratégicos: Gracias a su versatilidad y altos estándares de calidad, UMESAL actúa como proveedor de primer nivel para sectores críticos como el ferroviario, aeroespacial, automoción, defensa y energías renovables. Su experiencia en el sector ferroviario es especialmente notable, participando en la fabricación de componentes estructurales y de seguridad para los principales fabricantes de trenes.

Calidad y Certificaciones: La organización mantiene un firme compromiso con la calidad, avalado por certificaciones internacionales (como la ISO 9001) y procesos de inspección rigurosos. Cuentan con salas de metrología equipadas para garantizar que cada componente cumple estrictamente con las tolerancias y especificaciones técnicas requeridas en planos.

En la actualidad, UMESAL S.L. se posiciona como un partner estratégico para la industria pesada y de precisión, ofreciendo una respuesta ágil, gran capacidad técnica y una solvencia contrastada en la ejecución de proyectos mecánicos de alta complejidad.

2.6. Tabla-resumen empresas

Empresa	Sede Principal	Especialización Principal	Sectores Clave	Colaboración en el proyecto	Paquete de Trabajo
GH Induction	Valencia, España	Sistemas de calentamiento por inducción e inductores 3D.	Automoción, Aeroespacial, Energía Eólica.	Asesoramiento técnico, Definición de diseño de soportes, Validación industrial	4, 5
Mecanizados S.A.	Valencia, España	Componentes mecánicos de precisión (CNC 5 ejes).	Aeronáutica, Defensa, Automoción.	Evaluación de calidad superficial y fidelidad geométrica, validación industrial	4
Metalworld Componentes SLU	Valencia, España	Estampación y acabados estéticos de alta calidad.	Mobiliario de diseño, Arquitectura, Retail.	Validación funcional de demostrador.	4
FTM (Fluid & Thermal Mng.)	Valencia, España	Ingeniería de sistemas térmicos e intercambio de calor.	Químico, Farmacéutico, Petroquímico.	Aportes en el diseño de demostradores	4
UMESAL S.L.	Valencia, España	Mecanizado de grandes dimensiones y utillajes.	Ferroviario, Defensa, Energías Renovables.	Aportes en el diseño de demostradores.	4

3. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

En el presente apartado se describen de forma estructurada y detallada las actividades desarrolladas en los distintos paquetes de trabajo que conforman el proyecto GREENLASER, orientado al desarrollo de la tecnología para la fabricación de piezas por PBF LB/M en láser verde.

La ejecución del proyecto se ha organizado en varios paquetes de trabajo interrelacionados, donde abarcan desde la gestión del polvo, su control del contenido de oxígeno, el desarrollo de parámetros para la fabricación aditiva de Cu en láser verde, hasta la validación de la viabilidad de poder fabricar en titanio por láser verde.

En paralelo a todos los PT del proyecto, se ha realizado la difusión de los avances y resultados obtenidos en distintos medios de interés. Se puede acceder a las noticias publicadas en medios internos a través del siguiente enlace: <https://actualidad.aidimme.es/2025/11/19/proyecto-greenlaser-hacia-la-industrializacion-de-la-fabricacion-aditiva-en-cobre>

3.1. Estudio de la procesabilidad de polvo de cobre con tecnología de láser verde (PAQUETE DE TRABAJO 4)

Este PT se centra en la procesabilidad del cobre en la fabricación aditiva de lecho de polvo con la tecnología de laser verde, incluye incorporar estrategia para la reutilización del polvo, mediante un control del contenido de oxígeno en éste y la procesabilidad tanto en paredes finas como en piezas másicas con polvo fino y polvo grueso. Este ultimo añade varias ventajas, como lo es el abaratamiento, el polvo grueso es mas barato que el fino, y la degradabilidad, el polvo grueso es menos sensible a la oxidación por su menor relación área volumen.

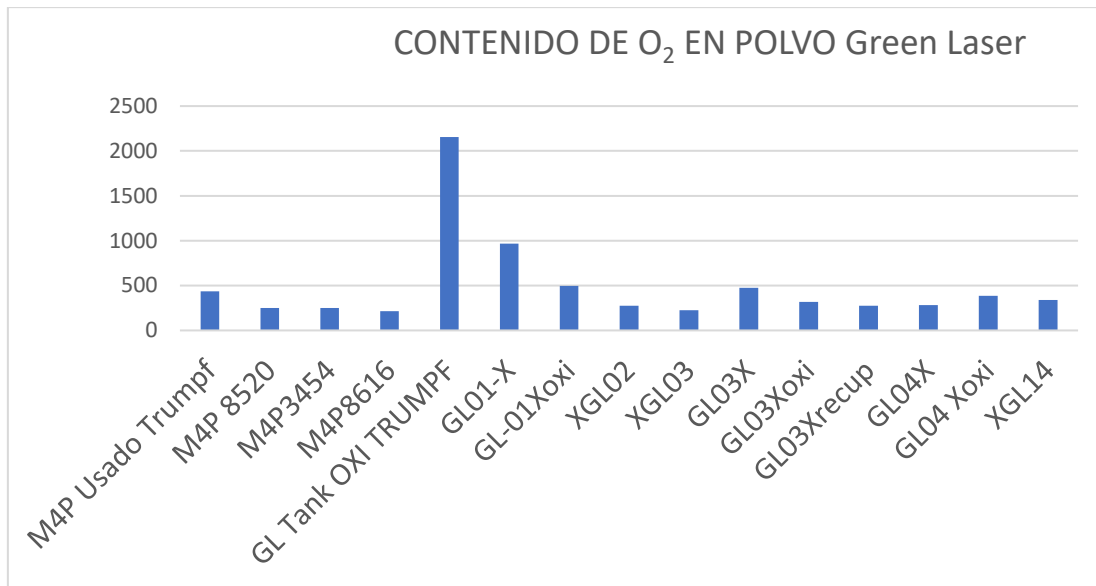
3.1.1. Tarea 4.1. Evolución del contenido de oxígeno en el cobre.

Este paquete tiene como objetivo evaluar la evolución del contenido de oxígeno tras cada reutilización del polvo, con la finalidad de poder garantizar que el polvo puede ser reutilizado sin menoscabo de sus prestaciones.

El cobre posee una gran avidez por el oxígeno, en el caso de los materiales en forma de polvo esta reactividad es aún mayor dada su relación área volumen, la cual es mayor cuán menor sea el tamaño del polvo.

El polvo de la primera fabricación (Lote 8520) se recibió con 251 PPM, sin embargo, tras la fabricación, se analizó y éste tenía 967 PPM, no obstante, el polvo de esa misma fabricación, pero de las zonas oscuras (se presume que es polvo mas oxidado) tiene 497 PPM, por otro lado, tras el tamizado, y un proceso de secado en vacío ese mismo polvo que es el que se va a emplear en la fabricación 2 (GL02), tiene un contenido de oxígeno de 277 PPM.

Estos cambios en los niveles de oxígeno nos dan indicios de que una gran responsabilidad en el nivel de oxígeno es el contenido de humedad del polvo.



Nivel de oxígeno en el polvo.

Adicionalmente pudimos constatar que dentro del tanque del rebosadero existía un polvo con un contenido de oxígeno muy elevado mas de 2000 PPM, ese polvo fue descartado, el tanque se limpió y se desarrolló un protocolo para la correcta eliminación del polvo de ese tanque tras la fabricación.

Lo importante a destacar en estos primeros análisis es que de manera general se aprecia un incremento en el nivel de oxígeno en la zona oscura de la fabricación, (ver figura 2) zona que intuimos y en cierto grado los resultados corroboran tienen un mayor nivel de oxígeno.

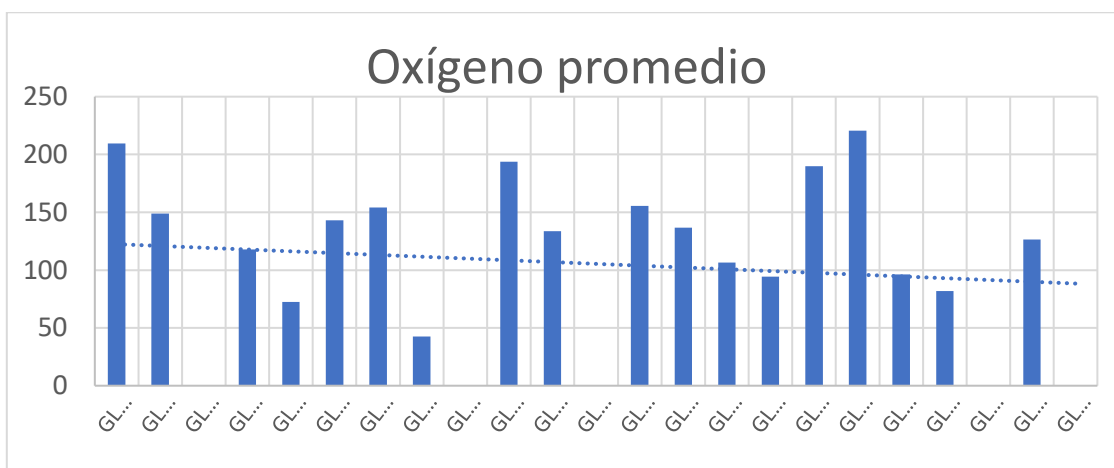
Si bien es cierto que, durante la fabricación, el polvo está dentro de una atmosfera controlada con un contenido de O₂ de 0,03% y en cierto grado esa atmosfera protege al polvo durante la fabricación, sin embargo, se puede observar que el polvo en la región cercana a las zonas fundidas cambia su tonalidad (figura 2). Esto se puede deber a la alta temperatura que alcanza el polvo que rodea la zona fundida y que por ello reacciona con el poco oxígeno presente o que la humedad que posea el polvo se disocie. generando moléculas de oxígeno que fomenten la oxidación.



Detalle del cambio de color del polvo

En la gráfica 2 se presenta la evolución del contenido de oxígeno promedio a lo largo de las fabricaciones, como se puede observar en esta gráfica, la primera fabricación, con polvo nuevo es la que tiene el mayor contenido de oxígeno con 210 PPM.

Se debe recalcar que el contenido de oxígeno de la fabricación 5 se debe a que por el tamaño de la pieza a fabricar se hizo el lote más grande con la adición de 65 Kg de polvo nuevo. Se ha logrado mantener el nivel de oxígeno por debajo de las 220 PPM a lo largo de mas de 20 fabricaciones, como puede apreciarse en la siguiente gráfica, se continuará investigando en este aspecto para determinar la variabilidad que presentan estos valores en los que puede haber un salto de mas 120 PPM entre una y otra fabricación.



Evolución del contenido de oxígeno en las fabricaciones

3.1.2. Tarea 4.2. Análisis Físicoquímico.

A lo largo de la ejecución de este proyecto, se llevaron a cabo intensivas campañas de caracterización, sumando más de 200 ensayos dedicados a la determinación del contenido de oxígeno. Estas mediciones se realizaron en una amplia variedad de muestras, incluyendo tanto polvos metálicos como muestras en estado macizo, lo que supuso un desafío en términos de representatividad y fiabilidad.

Se realizó un proceso de análisis de elementos patrón, para determinar la fiabilidad y el nivel de incertidumbre de las mediciones.

Es fundamental destacar que todos los ensayos analíticos se realizaron siguiendo estrictamente los procedimientos descritos en la norma internacional ASTM E1019 y la E 2575 específica para cuantificar el contenido de oxígeno en cobre.

3.1.3. Tarea 4.3. Desarrollo de parámetros de cobre con polvo fino y polvo grueso.

En el marco de la Tarea 4.3, se realizaron diferentes fabricaciones de acuerdo con diferentes

DOE en donde se evaluaron diversas estrategias de fabricación asociadas a variables como espesores de piezas, potencia y velocidad.

A lo largo de las fabricaciones, aprovechando el tamaño de la placa de fabricación, se fueron evaluando en conjunto o por separado diferentes variables o estrategias.

A continuación, se resume lo estudiado a lo largo de las diferentes fabricaciones, en referencia a esta tarea.

Fabricación

GL-001 Prueba del equipo con un contenido de Oxígeno de 210PPM

GL-002 Testigos para evaluar desempeño del equipo con parámetros estándar, se obtuvo un alto grado de porosidad de los testigos, los cuales presentaron fugas generalizadas.

GL-003 Fabricación fallida

GL-004 Se fabricaron testigos para determinar la capacidad de fabricación en vertical de prismas huecos cuadrados y cilíndricos, a pesar de los fenómenos de dilatación en los prismas cuadrados, en general presentan buena definición dimensional, sin embargo, presentan una superficie rugosa.

GL-005 Tras un cambio en los parámetros de fabricación, se evaluó la viabilidad de fabricar piezas de pared de 1 mm con geometrías complejas. Se obtuvo una presencia elevada de fugas, además se determina que se debe estudiar la morfología y disposición de los soportes, para facilitar su remoción.

GL-006 Se realiza un cambio en la estrategia de manejo del polvo y se evalúa el nivel de oxígeno y modificación de la geometría de los soportes. Se determina que la morfología del soporte afecta en el grado de oxidación (cambio de color) de las piezas.

GL-007 Fabricación fallida.

GL-008 Se realiza un experimental buscando los límites de espesor que se pueden fabricar y un DOE para diferentes inclinaciones de pared. Se determina que espesores entre 0.8 y 0.9 mm no garantizan estanqueidad y espesores menores a 0,8 mm no se pueden fabricar.

GL-009 Fabricación fallida, pero con elementos utilizables. Se caracterizó conductividad con diferentes parámetros de fabricación evaluados.

GL-010 Con los resultados del experimental anterior se fabricó una pieza de morfología compleja con paredes delgadas y canales internos, hubo un fallo del rake, no se podía comprobar la pieza quedó inconclusa.

GL-011 Se realizó un DOE para mejorar parámetros en volados. Se definieron parámetros para diferentes espesores.

GL-012 Se realizó un DOE para definir límites para realizar una guía de diseño. Fallo por desplazamiento de la placa. Se desplazó la placa y no se pudo fabricar.

GL-013 Se realizó el DOE para definir límites para realizar una guía de diseño. Se definieron los límites para la Guía de diseño.

GL-014 Aprovechando los límites definidos en el experimental anterior, se posicionó un elemento voluminoso de geometría compleja. La pieza fabricada se ensayó a 6 Bar y no presentó fugas.

GL-015 Se realizó un DOE para mejorar el tema de soportes, que permitan una mejor eliminación. Se definieron diferentes estrategias de soportes.

GL-016 Se realizó un DOE para mejorar el acabado superficial en espesores de 40 y 80µm, y la posibilidad de fabricar con mayores inclinaciones. Se escogieron parámetros de fabricación en función de los espesores a fabricar.

GL-017 Se realizó un experimental para mejorar el acabado superficial en piezas horizontales, así como la influencia del espesor de capa. El espesor de capa juega un papel importante en el acabado superficial.

GL-018 Se realiza un experimental en función de potencia y velocidad para polvo fino (estándar) tanto a 40 µm como a 80 µm. Se realizó un análisis de densificación y conductividad.

GL-019 Se realiza un experimental en función de potencia y velocidad para polvo medio (45 ~ 105 µm) tanto a 40 µm como a 80 µm. Se realizó un análisis de densificación y conductividad.

GL-020 Se realiza un experimental en función de potencia y velocidad para polvo grueso (100 ~ 200 µm) tanto a 40 µm como a 80 µm. Se realizó un análisis para el proyecto MADISON de densificación y conductividad con polvo extra grueso.

GL-021 Se realizó un DOE para fabricar multi geometrías y estructuras reticulares. Falló la fabricación, por desplazamiento de la placa. Se subcontrata la fabricación de un juego de placas para evitar estos reiterados retrasos.

GL-022 Se realizó un DOE para fabricar multi geometrías muy complejas para PBF y estructuras reticulares. Se obtuvo una serie de piezas con características satisfactorias, los elementos de 1 mm de espesor sin fugas a 6 Bar.

GL-023 Un DOE para paredes más finas, hasta 0.6 mm, con parámetros de diferentes energías y diferente tipo de soporte. Se ha fabricado piezas completamente estancas con espesor de pared de 0,9 mm las de 0,8 presentan algún microporo o pequeña porosidad en zonas donde convergen dos o más paredes.

Guía de diseño para fabricación aditiva mediante la tecnología de la Green Laser de la TruPrint 5000

La fabricación aditiva permite crear piezas metálicas complejas, sin embargo, hay pautas de diseño específicas que deben seguirse para garantizar la optimización del proceso.

Estas son las reglas que podemos incorporar para el diseño y la fabricación aditiva en metal:

1. Tener en cuenta la orientación de la geometría para favorecer un mejor acabado de las piezas y evitar dilataciones en el proceso, así como minimizar el soporte.

- Paredes con una inclinación inferior a 45° necesitan soporte en toda su extensión, por lo cual se aconseja orientar todas sus caras con un ángulo igual superior a los 45° en la medida de lo posible. Ya que de lo contrario es necesaria la utilización de soporte. Ejemplo:

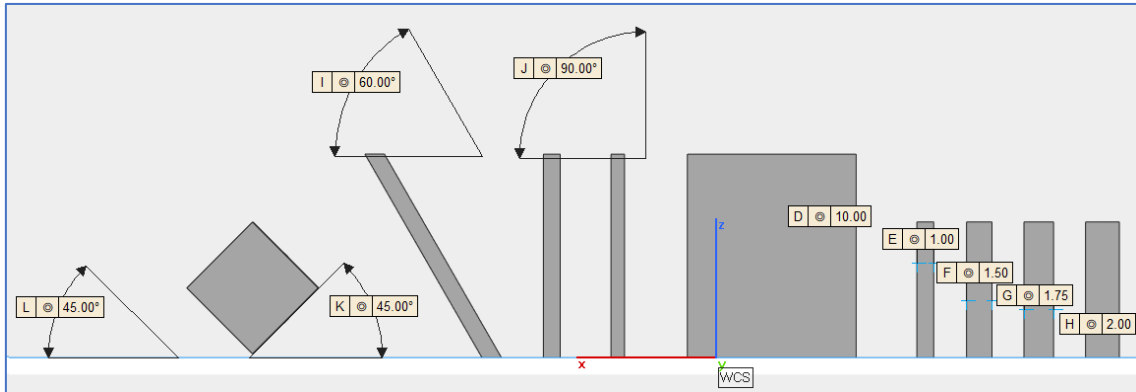


Figura 1. Espesores y grados de inclinación

2. Detalles mínimos de relieve, espesores mínimos y longitudes en el eje de coordenadas X: 1 mm, Y: 7 mm y en Z: 0,8 mm.

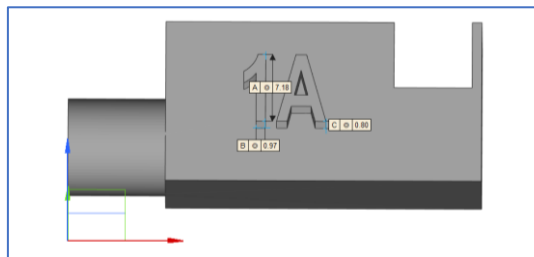


Figura 2. Detalle de relieve

3. Diámetros de tubos y taladros con un mínimo de 2 mm para la adecuada limpieza de conductos internos. Para taladros con rosca se aconseja roscar a posteriori en diámetros inferiores a 5 mm, así como el repasado del filo con los machos de roscar una vez fabricada la pieza en el caso de que se fabrique el taladro con rosca.

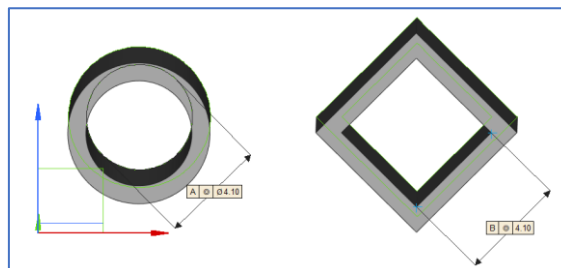


Figura 3. Diámetros de tubos.

4. Puentes horizontales sin soporte, máximo posible sin soporte, 4 mm.

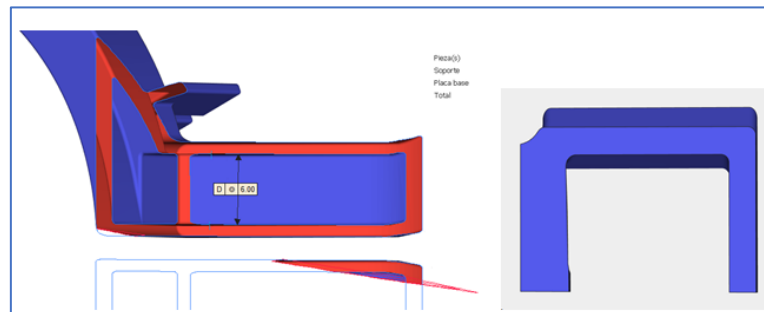


Figura 4. Biapoyados sin soporte.

5. El Espacio mínimo posible entre dos partes es de 1mm, aconsejado por la tecnología 1,5 mm.

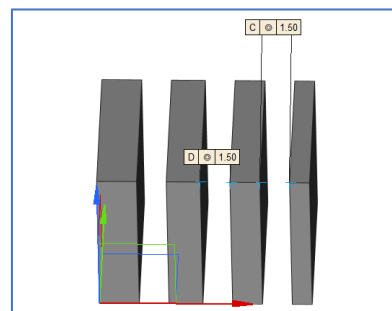


Figura 5. Separación entre partes.

	VALORES
Mínimo de ancho de pared recomendable (con o sin soporte)	1 mm
Inclinación a partir de la cual se necesita soporte	45°
Detalles mínimos posibles de relieves en la superficie	X: 1 mm, Y: 7 mm y en Z: 0,8 mm
Menor diámetro para la adecuada limpieza de conductos internos.	2 mm
Puentes-biapoyados horizontales (máximo posible sin soporte)	4 mm
Espacio mínimo posible entre dos partes.	1mm
Mínimo entre dos partes aconsejado por la tecnología.	1,5 mm
Diámetro mínimo de taladros con rosca estándar optimizando la escala y tolerancias	5 mm
Fabricación de piezas en el aire sin contacto con la bandeja de fabricación.	No es posible

- Edición del soporte, todos los planos con un ángulo inferior a 45° deberán llevar soporte según podemos ver en la imagen, con un contacto directo sobre las piezas diseñadas y la placa de fabricación para poder facilitar una correcta transmisión de la temperatura, el cual, disipará el exceso de concentración de energía.

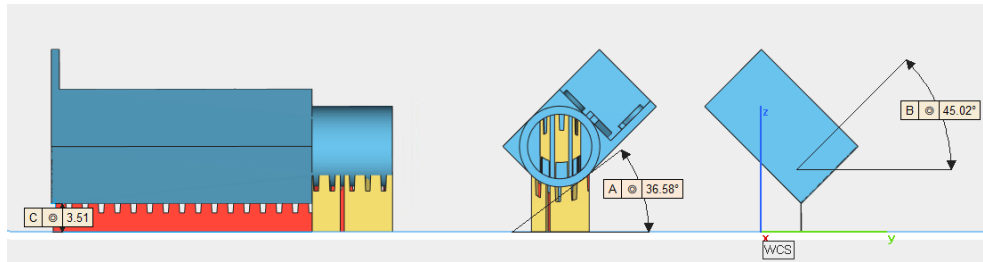


Figura 5. Edición de soportes.

- A tener en cuenta: a mayor espesor de pared o arista mayor necesidad de reforzar el soporte con sombrados más estrechos, incluso con pilares sólidos para que pueda evacuar la concentración de calor para evitar malformaciones de las piezas y dilataciones.
- Para facilitar la separación posterior de los soportes es necesario dejar tanto en su parte superior como en la inferior un contacto a través de dientes, ya que de lo contrario si dispusiéramos una línea de soporte continua complicaría en exceso la separación del mismo y los postprocesos de acabado de las piezas fabricadas.

Siguiendo estas reglas de diseño, se puede optimizar la fabricación aditiva en metal, lo que da como resultado piezas que cumplen sus requisitos funcionales y su proceso de fabricación en la tecnología.

3.1.4. Tarea 4.4. Estudio de la Influencia del espesor de capa en la densificación de las piezas de cobre.

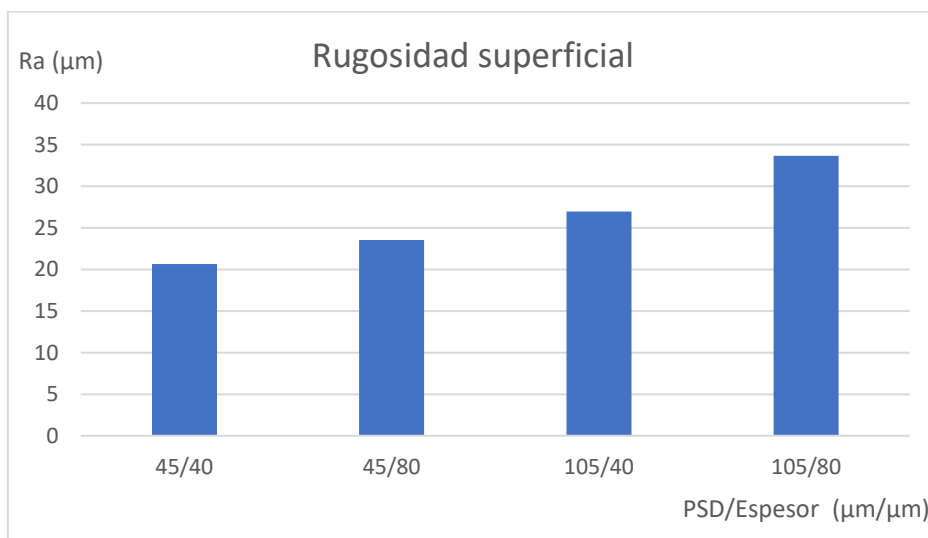
A lo largo de diferentes fabricaciones se han ido realizando experimentales sobre la influencia del espesor de capa en la densificación y características del material procesado en espesores de capa mayores.

A lo largo de las fabricaciones se fueron realizando experimentales con la finalidad de poder fabricar con mayores espesores de capa, los resultados obtenidos permiten establecer que el espesor de capa es una variable crítica que afecta tanto la densificación como el acabado superficial y la conductividad eléctrica del material. Si bien se han definido parámetros óptimos para ciertos rangos, aún persisten dudas sobre su comportamiento en geometrías horizontales y en condiciones de fabricación más exigentes.

3.1.5. Tarea 4.4. Desarrollo de parámetros de cobre con polvo fino y polvo grueso.

Se ejecutaron diversos Diseños de Experimentos (DOE) orientados a la optimización geométrica y de acabado empleando diferentes granulometrías de polvo 15 ~ 45 μm y 45 ~ 105 μm . Estos trabajos permitieron definir parámetros específicos para la fabricación de diversas geometrías con diferentes espesores de capa, estudiar la facilidad de eliminación de soportes y evaluar la influencia de la inclinación y el espesor de capa (40 y 80 μm) en la rugosidad superficial. Aunque se lograron avances significativos en la caracterización de la conductividad y densificación se determinó que había una pérdida de definición evaluado a través de la rugosidad.

Mediante el ajuste de variables de potencia y velocidad de escaneo, se realizaron estudios comparativos de densificación y conductividad eléctrica para cada rango de tamaño de partícula. Este bloque experimental resultó clave para entender cómo la morfología del polvo afecta la calidad final de la pieza en combinación con los parámetros de la máquina.



Rugosidad en función del espesor de capa y de PSD del polvo

Se puede notar como el incremento del espesor de capa hace aumentar la rugosidad, perdiendo definición, pero el incremento del tamaño de partícula es mucho más sensible, siendo 13 % mayor en el caso del espesor de capa y 30 % mayor en el caso del tamaño de partículas.

3.1.6. Tarea 4.5. Desarrollo de demostradores.

En esta tarea es donde más se manifiesta la colaboración de las empresas, en ella no solo colaboraron en el desarrollo y diseño de los diferentes demostradores, sino que evaluaron, validaron y comprobaron el desempeño de las piezas elaboradas por FA de Cu en láser verde.

Determinaron las ventajas y/o inconvenientes que encontraron a la hora de poner en funcionamiento dentro del entorno industrial piezas elaboradas en esta tecnología.

Destacando en una aplicación la versatilidad, funcionalidad y facilidad del empleo de esta tecnología en sus aplicaciones. En otros casos resaltaron la falta de acabado superficial como un hándicap en su aplicabilidad.

3.1.7. Conclusiones PT4

Los resultados experimentales indican que la FA de cobre en PBF LB/M láser verde es viable, repetible y estable, pudiéndose fabricar piezas densas, estancas hasta 6 bar, con espesores de pared de 0,9 mm o mas.

Que la mayor conductividad se observa en las muestras con espesor de capa de 40 μm fino.

Que la conductividad disminuye al aumentar el espesor de capa y también con el tamaño de partícula.

Que las muestras de 80 μm con polvo grueso presentan los valores más bajos de conductividad y mayor rugosidad.

La morfología de los soportes influye directamente en la oxidación y la estabilidad dimensional. Los soportes deben ser diseñados para garantizar una adecuada disipación térmica (ej. dientes más anchos) para minimizar la concentración de energía, la oxidación localizada (polvo oscuro) y los defectos de dilatación.

Existen limitaciones de espesor de pared para la fabricación aditiva de cobre estanca. Para asegurar piezas completamente selladas (sin fugas a 6 bar), se requiere un espesor de pared mínimo de 0.9 mm con los parámetros optimizados.

Los parámetros de proceso que optimizan la conductividad y densificación son sensibles a la geometría y a las características del polvo. Se confirma que:

Los parámetros para paredes gruesas ofrecen mejor conductividad eléctrica.

Un menor espesor de capa (40 μm) es preferible para una mayor conductividad y mejor acabado superficial.

El uso de polvo fino a medio es esencial, ya que el polvo grueso resulta en falta de fusión.

Ciertas estrategias de fabricación, como los tiempos de espera y la adición de contornos, son ineficaces o perjudiciales para la conductividad, mientras que la densificación y la conductividad se maximizan manteniendo un espesor de capa bajo y seleccionando potencias óptimas.

3.2. Estudio de la procesabilidad de polvo de titanio con tecnología de láser verde (PAQUETE DE TRABAJO 5).

Los objetivos planteados dentro del proyecto son los siguientes:

- Obtención de los parámetros de fabricación con polvo fino de una aleación de titanio en piezas tanto de pared fina como elementos másicos.
- Obtención de los parámetros de fabricación con polvo grueso de una aleación de titanio de piezas con geometrías básicas.
- Interactuar con las empresas comprometidas en el desarrollo de demostradores que potencien su aplicabilidad, proponiendo piezas, elementos de interés en su propio sector.

Viabilidad Técnica y Justificación del Láser Verde

El uso de láser verde (515nm) en titanio es una solución no estándar. El fabricante desaconseja esta tecnología para dicho material basándose en tres factores críticos:

Física de Materiales: El láser verde es ideal para metales altamente reflectantes (cobre u oro). Sin embargo, el titanio es un material "oscuro" que ya absorbe eficientemente el láser infrarrojo (IR) estándar (30-40% en sólido). El láser verde no aporta una mejora metalúrgica que justifique su complejidad.

Eficiencia Energética y Coste: Los láseres verdes tienen un mayor CAPEX (coste de adquisición) y OPEX (mantenimiento y electricidad) comparados con los de fibra infrarroja, conocidos por su robustez y fiabilidad industrial.

Complejidad Operativa: El cambio de material a titanio en estas máquinas requiere no solo una limpieza profunda, sino la intervención de técnicos especializados para sustituir filtros y componentes ópticos sensibles.

Se intentó aislar la máquina, contando con el apoyo de GH Induction y de Fluid and Thermal Managment, sin embargo por la complejidad del flujo del gas protector y del sistema de filtros esta vía se descartó

No obstante, se planteó la opción de realizar unos experimentales que en cierta manera validen la viabilidad del proceso.

Estudio Experimental con Polvo Fino (15-45 µm)

Se realizó un estudio para caracterizar los límites de la tecnología mediante una placa con cavidades mecanizadas de distintas profundidades (0.04 a 0.1 mm) para evaluar la profundidad de penetración (Melt Pool) y la interacción polvo/sustrato.

Resultados y Comparativa de Parámetros

El análisis microscópico determinó que los parámetros óptimos para una fusión estable fueron 400 W de potencia y 800 mm/s de velocidad. Al comparar estos datos con el láser infrarrojo tradicional, se observa una ineficiencia energética notable:

Parámetro	Láser Verde (Óptimo)	Láser Infrarrojo (Ref.)
Potencia	400 W	180 W
Velocidad	800 mm/s	1000 mm/s
Tamaño del Spot	210 µm	35-50 µm

El láser verde requiere más del doble de potencia debido a su gran tamaño de spot (210 µm). Al dispersarse la energía en un área 17 veces mayor que la del infrarrojo, la densidad de energía

cae drásticamente, obligando al sistema a inyectar una potencia bruta muy elevada para alcanzar el umbral de fusión.

Estudio Experimental con Polvo Grueso (45-105 μm)

Se replicó el ensayo utilizando polvo de mayor granulometría para verificar si la alta energía identificada seguía siendo necesaria. Se evaluaron potencias hasta 400 W y velocidades entre 800-1000 mm/s.

Se determinó que la combinación de máxima potencia (400 W) y mínima velocidad (800 mm/s) es la única que produce un acabado superficial de calidad.

Además, esta alta densidad de energía es crítica para vencer la inercia térmica de las partículas de mayor tamaño y garantizar la consolidación de la capa, evitando defectos como la porosidad o el balling (aglomeración irregular).

Influencia del Espesor de Capa (Tarea 5.2)

Se evaluó si aumentar el espesor de capa (de 0.04 mm a 0.1 mm) permitiría acelerar la fabricación. Manteniendo los parámetros óptimos (400W / 800 mm/s), se observó un deterioro progresivo:

0.04 mm (Estándar): Fusión eficiente, líneas definidas y mínima porosidad.

0.06 mm: Degradación visible; las líneas de fusión pierden nitidez y se vuelven irregulares.

0.10 mm (Máximo): Falla crítica. Aparecen aglomerados (balling) y zonas sin fusión. La superficie es tosca, comprometiendo la estanqueidad y las propiedades mecánicas.

Resumiendo, se puede decir que:

El uso de 400W frente a los 180W estándar supone un incremento masivo en el consumo eléctrico y estrés térmico del sistema de refrigeración.

La menor velocidad de escaneo (800 mm/s) ralentiza el lead time, aumentando el coste de amortización por pieza.

Para fabricar componentes funcionales y estancos en Titanio con láser verde, es obligatorio mantener el espesor de capa en 0.04 mm. El aumento de potencia compensa el punto de fusión del material, pero es incapaz de compensar un lecho de polvo excesivo.

3.2.1. Resumen PT5

Aunque técnicamente es posible fabricar en Ti6Al4V con láser verde, el proceso es menos eficiente que con infrarrojo. El gran tamaño del haz del equipo verde diluye la energía, exigiendo potencias de 400 W para lograr lo que un láser convencional logra con menos de la mitad. El uso de esta tecnología para titanio queda restringido a fines de investigación o caracterización, pero no como una solución productiva rentable.

El láser verde es una tecnología de nicho. Su aplicación en Titanio representa un sobrecoste financiero y energético innecesario frente a la tecnología infrarroja, que es más madura, rápida y eficiente para este material específico.

4. Conclusiones generales.

Del análisis de los resultados del proyecto, se puede concluir que:

La morfología de los soportes influye directamente en la oxidación y la estabilidad dimensional. Los soportes deben ser diseñados para garantizar una adecuada disipación térmica (ej. dientes más anchos) para minimizar la concentración de energía, la oxidación localizada (polvo oscuro) y los defectos de dilatación.

Existen limitaciones de espesor de pared para la fabricación aditiva de cobre estanca. Para asegurar piezas completamente selladas (sin fugas a 6 bar), se requiere un espesor de pared mínimo de 0.9 mm con los parámetros optimizados.

Los parámetros de proceso que optimizan la conductividad y densificación son sensibles a la geometría y a las características del polvo. Se confirma que:

Los parámetros para paredes gruesas ofrecen mejor conductividad eléctrica.

Un menor espesor de capa (40 μm) es preferible para una mayor conductividad y mejor acabado superficial.

El uso de polvo fino genera el mejor acabado superficial.

Ciertas estrategias de fabricación, como los tiempos de espera y la adición de contornos, son ineficaces o perjudiciales para la conductividad, mientras que la densificación y la conductividad se maximizan manteniendo un espesor de capa bajo y seleccionando potencias óptimas.

Se determinó que para el caso del titanio, la mejor calidad de fusión y acabado superficial (indicador de consolidación completa y ausencia de balling) se logra con:

Potencia: 400 W

Velocidad: 800 mm/s

Hatch Spacing: 0.08 μm

Los ensayos con polvo grueso (45-105 μm) confirmaron que los parámetros de alta energía siguen siendo los más eficientes. El aumento del tamaño de partícula refuerza la necesidad de maximizar la energía volumétrica y el tiempo de interacción láser-materia para vencer la inercia térmica.

A pesar de ser menos eficiente energéticamente debido a la óptica del equipo, el láser verde es capaz de consolidar de forma estable el Ti6Al4V, permitiendo incluso la fabricación de piezas "demostradores" (altorrelieves de titanio sobre placas de acero inoxidable).

5. Bibliografía

Moghimian, P., Poirí e, T., Habibnejad-Korayem, M., Arreguin Zavala, J., Kroeger, J., Marion, F., & Larouche, F. (2021). Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys. *Additive Manufacturing*, *43*, 102017.

Derimow, N., Romero, A., Rubio, A., Terrazas, C., Medina, F., Wicker, R., & Hrabe, N. (2021). Sintered powder oxidation variation as a function of build height for titanium alloy produced by electron beam powder-bed fusion. *Additive Manufacturing Letters*, *1*, 100023.

Tang, H. P., Qian, M., Liu, N., Zhang, X. Z., Yang, G. Y., & Wang, J. (2015). Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting. *JOM*, *67*(3), 654–664.

Yamaguchi, M., Kushima, K., Ono, Y., Sugai, T., Oyama, T., & Furumoto, T. (2023). Humidity control in laser powder bed fusion using titanium alloy powder for quality assurance of built parts and reusability of metal powder. *Journal of Materials Processing Technology*, *311*, 117817.

Santecchia, E., Spigarelli, S., & Cabibbo, M. (2020). Material Reuse in Laser Powder Bed Fusion: Side Effects of the Laser—Metal Powder Interaction. *Metals*, *10*(3), 341.

Feng, Z., Marks, C. R., & Barkatt, A. (2003). Oxidation-Rate Excursions during the Oxidation of Copper in Gaseous Environments at Moderate Temperatures. *Oxidation of Metals*, *60*(5/6), 573–588.

Carpenter Additive. (s.f.). *Powder Degradation in Serial Production case study* [Caso de estudio]. Carpenter Additive. <https://www.carpenteradditive.com/casestudy>

Petrovic, V., & Niñerola, R. (2015). Powder recyclability in electron beam melting for aeronautical use. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, *87*(2), 147–155

Guschlbauer, R., Burkhardt, A. K., Fu, Z., & Körner, C. (2020). Effect of the oxygen content of pure copper powder on selective electron beam melting. *Materials Science & Engineering A*, *779*, 139106

Kang, S.-G., Gainov, R., Heußen, D., Bieler, S., Sun, Z., Weinberg, K., Dehm, G., & Ramachandramoorthy, R. (2023). Green laser powder bed fusion based fabrication and rate-dependent mechanical properties of copper lattices. *Materials & Design*, *231*, 112023

Nordet, G., Gorny, C., Mayi, Y., Daligault, J., Dal, M., Efferelli, A., Blanchet, E., Coste, F., & Peyre, P. (2021). Absorptivity measurements during Laser Powder bed Fusion of pure copper with a 1kW cw green laser. *Optics and Laser Technology*, *145*, 107474

AIDIMME

Instituto Tecnológico

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es

www.aidimme.es