ENTREGABLE E4.2

PROYECTOS—

2024-2025

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

“GREENLASER”

Entregable: E4.2 Demostradores Cu

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.

GENERALITAT VALENCIANA
Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea
AIDIMME
Instituto Tecnológico

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO.....1

2. RESULTADOS OBTENIDOS.....2

3. ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO.....3

3.1 PROPUESTAS DE DEMOSTRADOR POR PARTE DE LAS EMPRESAS.....3

3.1.1. GH INDUCTION.....3

3.1.2. MECANIZADOS S.A. BUJÍAS.....6

3.1.3. FLUID & THERMAL MANAGMENT INTERCAMBIADOR DE CALOR.....7

3.1.4. METAL WORLD ELECTRODOS PARA ELECTROEROSIÓN 9

3.1.5 UMESAL.....10

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....11

5. CONCLUSIONES.....11

1.Introducción, objetivos del proyecto

La tecnología de fusión de lecho de polvo por láser (PBF-LB/M) se ha posicionado como el método predominante en fabricación aditiva frente a la fusión por haz de electrones, gracias a su capacidad para ofrecer mayor precisión, detalle y libertad de diseño mediante el uso de polvos de granulometría fina. El proceso consiste en la fusión selectiva de capas de polvo metálico mediante una fuente láser. Sin embargo, la industria se enfrenta actualmente a limitaciones específicas, como la dificultad de procesar cobre puro con láseres infrarrojos convencionales debido a la alta reflectividad del material, y el uso estandarizado de polvos finos que encarecen el proceso.

Este proyecto aborda estas problemáticas mediante dos vías de innovación. En primer lugar, la implementación de láser verde, el cual mejora drásticamente la absorción energética del cobre, permitiendo su procesamiento con menor potencia. En segundo lugar, se cuestiona el estándar del uso exclusivo de polvo fino (20-50 micras), proponiendo la evaluación de polvos más gruesos (superiores a 50 micras) tanto para cobre como para Ti64. El uso de polvo grueso presenta ventajas potenciales significativas: menor reactividad y oxidación, reducción del riesgo de inflamabilidad, menor coste de materia prima y la posibilidad de aumentar la productividad, buscando demostrar que es posible obtener resultados industriales viables modificando estos paradigmas establecidos.

El propósito central del proyecto es desarrollar y validar los parámetros de procesamiento para la fabricación de componentes de cobre puro (99,95) utilizando tecnología de láser verde, comparando el rendimiento entre el polvo fino convencional y el polvo grueso. Se pretende alcanzar la fabricación de demostradores industriales funcionales que validen esta metodología.

De manera específica, se busca obtener parámetros que garanticen una densificación superior al 98% tanto en geometrías de pared delgada como en elementos macizos para ambos tipos de polvo. Asimismo, se investigará el uso de diferentes espesores de capa para optimizar los tiempos de producción y se realizará una caracterización microestructural exhaustiva de las piezas resultantes. Un punto clave será la evaluación de la sostenibilidad del proceso, analizando el grado de oxidación del polvo a través de múltiples ciclos de reutilización para reducir el desperdicio de material. Finalmente, el proyecto contempla la colaboración directa con empresas para el desarrollo de aplicaciones reales y la difusión de los beneficios técnicos del láser verde en la industria.

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

2. Resultados obtenidos

Las empresas involucradas en el proyecto, GH induction, MECANIZADOS S.A., Metal World, Thermal and Fluid Technologies y UMESAL, estuvieron muy interesados en el desarrollo de éste, han presentado sus inquietudes y propuesto diferentes demostradores, los cuales en ocasiones han sido verdaderos retos para la tecnología, algunos han sido satisfactorios otros no tanto, pero les queda la certeza que es una herramienta a disposición.

Se fabricaron diferentes demostradores que fueron ensayados por las diferentes empresas involucradas. En el caso de GH determinó que esta tecnología tiene ventajas sobre la que usualmente emplea, PBF EB/M. Determinó que el acabado superficial, la facilidad de remoción del polvo dentro de sus bobinas y el flujo de refrigerante en las bobinas fabricadas en esta tecnología es superior a la que ellos emplean.

Metalworld, UMESAL, MECANIZADOS y Fluid & Thermal, valoraron sus demostradores destacando sus ventajas e inconvenientes.

Se Interactuó con las empresas comprometidas en el desarrollo de demostradores potenciando su aplicabilidad, éstas proyectaron piezas, elementos de interés en su propio sector.

Los demostradores fabricados fueron evaluadas, ensayadas y validadas en sus empresas y emitieron sus resultados, que de manera general son satisfactorios.

Estos demostradores han ayudado a diseminar y difundir las bondades de la PBF-LB/M con láser verde.

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

3. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

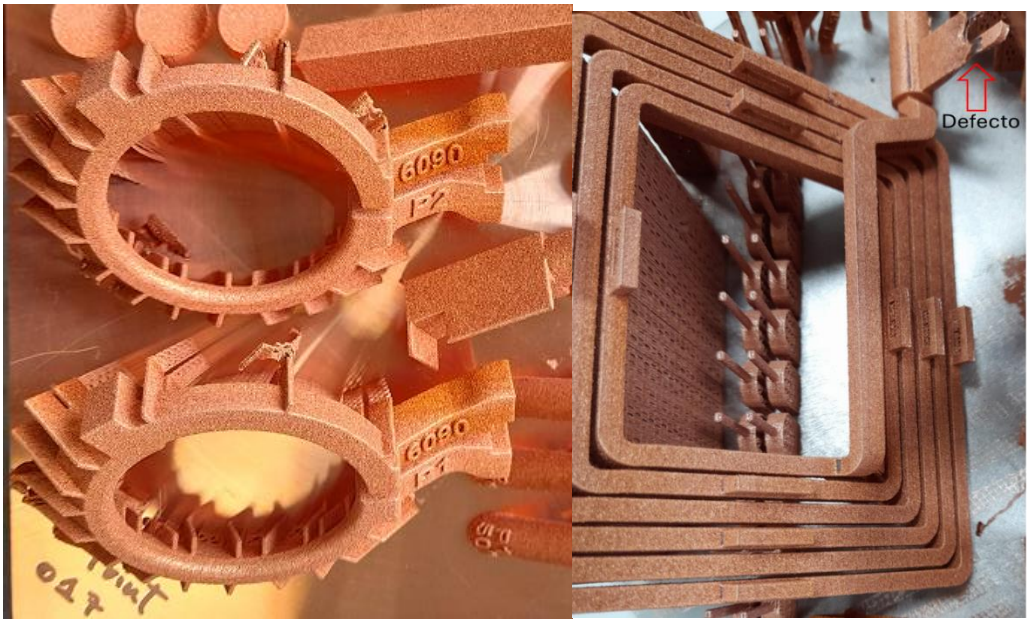
3.1. Propuestas de demostrador por parte de las empresas.

3.1.1. GH Induction.

GH a lo largo del proyecto ha propuesto diferentes elementos con geometrías complejas y diferentes espesores como piezas que tienen os requisitos para comprobar la versatilidad de los parámetros desarrollados.

GH, propuso varios demostradores, los cuales validó en cuanto a facilidad de limpieza de los canales internos y de estanqueidad.

Además solicitó dos demostradores los cuales los ensayó en condiciones de trabajo industrial realizando innumerables ciclos de trabajo cualificando el desempeño de estos.



Ejemplo de los prototipos ensayados por GH

Se procedió a la evaluación rigurosa de los diferentes testigos y demostradores funcionales fabricados en cobre mediante el proceso de Fusión Láser en Lecho de Polvo (L-PBF), siendo la prueba de estanqueidad el criterio definitivo para validar la integridad del material. La presión de prueba se mantuvo a 6 bares.

Integridad de los Demostradores Circulares (Izquierda)
En el caso de los demostradores de geometría circular (ubicados a la izquierda), la correcta ubicación y densificación de las estructuras de soporte resultó ser un factor crítico para el éxito. El diseño optimizado de los soportes en esta zona garantizó la evacuación uniforme del calor y la estabilidad dimensional durante la fabricación. Como resultado directo de esta

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

gestión precisa, estas muestras superaron satisfactoriamente la prueba de estanqueidad a 6 bar. Este éxito valida la capacidad del proceso, bajo parámetros optimizados, de producir componentes de cobre libres de porosidad interconectada.

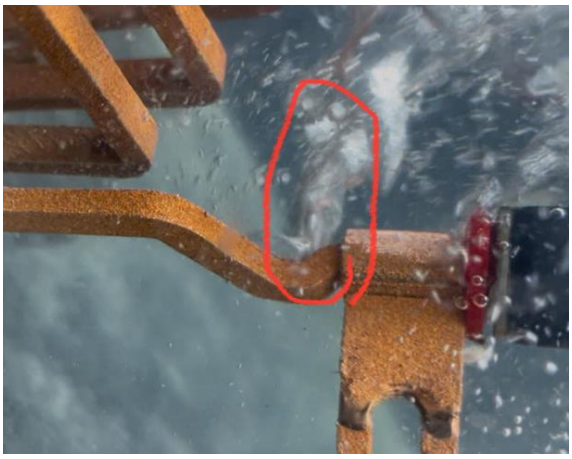
Análisis del Demostrador con Cambio de Sección (Derecha)

El demostrador ubicado a la derecha, que presentaba un conector con un cambio de sección brusco y una fabricación en un ángulo mayor a 45º (zona downskin), reveló las sensibilidades inherentes al proceso.

Detección de Defectos: Como se pudo observar en la esquina superior derecha del demostrador, a pesar de que el ángulo de fabricación es favorable (overhang menor a 45º), la transición geométrica y el cambio de sección generaron un pequeño defecto localizado. Este defecto se materializó como una microporosidad o discontinuidad superficial en el área crítica de cambio de geometría.

Fallo en la Estanqueidad: Pese a la observación del defecto superficial, el demostrador fue sometido a la prueba de estanqueidad y presentó fugas significativas. Las fugas, tal como se visualizaron en la figura posterior (aludiendo a la evidencia de la prueba), se atribuyeron directamente a la falta de soporte adecuado y densificado en esa área de transición geométrica.

El análisis concluye que en zonas de geometría compleja o cambios de sección, la falta de un soporte robusto y estratégicamente ubicado impide la adecuada disipación del calor y la correcta consolidación del polvo. Esto resulta en la formación de porosidad interconectada, la cual compromete irreversiblemente la funcionalidad del componente al no superar el requisito de estanqueidad a 6 bar. Esta evidencia subraya la necesidad de un diseño de soportes específico y ultradensificado para cada transición crítica en la geometría del cobre.



GH Induction ha estado apoyando este proyecto en el desarrollo de la optimización de soportes, sobre todo a nivel de piezas huecas con morfologías complejas.

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Finalmente, GH Induction ensayó en ciclos reales dos demostradores para su posible comercialización.





Ensayos realizados por GH en sus instalaciones del comportamiento y eficiencia de inductores fabricados por PBF LB/M laser verde.

Los puntos a destacar de estos demostradores se resumen a:

- Conductividad eléctrica superior a 99 % IACS.
- Facilidad para la remoción del polvo dentro de los canales.
- Mejor flujo de refrigerante dentro de los canales.
- Mejor acabado superficial.

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

3.1.2. Mecanizados S.A. Bujías

La empresa Mecanizados necesitaba realizar una pieza cuya conductividad térmica era el principal requisito y nos propuso ese demostrador.





La evaluación de los electrodos de las bujías fabricados mediante la tecnología aditiva de láser verde proporcionó resultados muy prometedores en términos de calidad superficial y fidelidad geométrica, aunque también identificó áreas clave de mejora.

Calidad Superficial y Definición de las Almenas

El acabado superficial y la definición geométrica de los electrodos se consideraron altamente satisfactorios, superando incluso las expectativas iniciales previstas para el proceso de fabricación aditiva con cobre.

Detalle Crítico en la Cúpula Interna

A pesar del éxito general en el acabado externo, se identificó un detalle que requiere atención y mejora en futuras iteraciones del diseño. El remate interno de la cúpula del electrodo (la cavidad interna) presentó imperfecciones. Específicamente, esta zona mostró los extremos residuales de las estructuras de soporte utilizadas durante el proceso de fabricación.

Aunque estos residuos son esperables en la zona de interfaz con soportes, su presencia en una cavidad interna dificulta la limpieza post-proceso y podría afectar el flujo o la funcionalidad interna del electrodo ya que se supone es una zona crítica. Este hallazgo exige la optimización del diseño de soportes o la implementación de un proceso de acabado superficial (como el pulido) específico para las cavidades internas. Sin embargo, las almenas (los detalles microestructurales o dentados en la parte interna del electrodo) mostraron una excelente definición y precisión, lo que es fundamental para optimizar la descarga eléctrica y la transferencia térmica. Este resultado valida la capacidad del sistema de láser verde para generar microestructuras complejas con alta fidelidad en cobre.

Desviaciones Dimensionales en los Orificios y Estrategia de Eliminación

En cuanto a los orificios pasantes del electrodo, los resultados fueron menos ideales. Los orificios presentaron desviaciones dimensionales significativas, lo que implica que la precisión intrínseca del proceso de fabricación aditiva no fue suficiente para cumplir con las tolerancias requeridas. Estas desviaciones, causadas probablemente por la difracción del láser o la acumulación de polvo fundido durante la fusión, hacen imprescindible un proceso de mecanizado posterior (como el taladrado de precisión o el escariado) para alcanzar las especificaciones funcionales.

Considerando el tiempo y el coste añadido que representa este mecanizado posterior obligatorio, se llegó a la conclusión de que la estrategia más eficiente y económica es omitir por completo la fabricación de los orificios mediante L-PBF. En su lugar, se recomienda fabricar la pieza en macizo o con una preforma simple, y delegar la creación de los orificios al proceso de mecanizado convencional. Esta estrategia simplifica la fabricación aditiva y asegura la precisión dimensional de los orificios con un coste total optimizado.

3.1.3. Fluid & Thermal Managment Intercambiador de calor

El equipo técnico de Fluid and Thermal Managment en principio ellos no comprendían el funcionamiento de esta tecnología, tras un par de llamadas telefónicas, vieron las oportunidades de desarrollo que ofrece la tecnología y propusieron un intercambidor de calor, el cual era muy voluminoso.



Demostrador fabricado con defecto en la pared

Como el componente no estaba destinado a pruebas funcionales inmediatas y el objetivo primordial del prototipo era validar la viabilidad de fabricación mediante esta tecnología., se optó por fabricar una sección representativa (corte técnico) en lugar de la pieza completa. Esta decisión se fundamentó en dos pilares:

Optimización de recursos: El demostrador completo requería un volumen excesivo de metal, elevando los costes y tiempos innecesariamente para una fase de validación geométrica.

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Mayor visualización, a través del corte se puede apreciar las geometrías internas de los conductos y su distribución.

Aprobación Técnica: El rediseño de esta sección fue consultado y validado por el equipo técnico de F&TM, asegurando que el corte mantuviera las características críticas para el estudio.

2. Análisis del Primer Demostrador y Mejora Continua

Durante la fabricación de la primera unidad, se detectó una anomalía estructural en una de las paredes laterales.

Tras un análisis post-fabricación, se determinó que la causa raíz fue un déficit en la transmisión de calor durante el proceso de solidificación/fusión, lo que impidió una unión óptima del material. Ante este escenario, se procedió de la siguiente manera:

Rediseño Geométrico: Se ajustaron los espesores y las transiciones en la zona afectada para favorecer una distribución térmica homogénea.

Segunda Fabricación: Se produjo una nueva versión del corte técnico aplicando estas correcciones.

3. Resultados Finales

El segundo demostrador no solo solucionó los defectos de integridad previos, sino que alcanzó un acabado superficial de alta precisión. Este hito confirma la capacidad de la tecnología empleada para cumplir con los estándares exigidos por F&TM y abre la puerta a su implementación en futuros proyectos de gestión de fluidos y térmica.



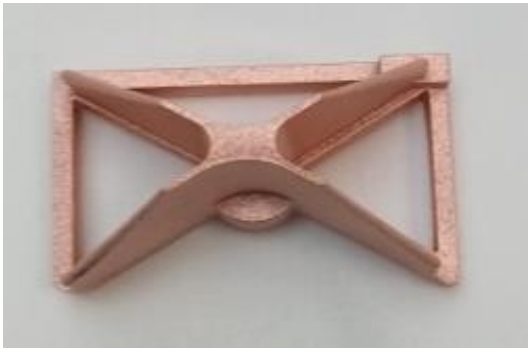
Corte fabricado del intercambiador de calor rediseñado.

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

3.1.4. Metal World Electrodos para electroerosión

Metal world a través de diferentes conversaciones con nuestro equipo técnico propuso la fabricación de un par de demostradores que a criterio de ellos serían un reto a esta tecnología.

Los demostradores fabricados y suministrados a la empresa.




El electrodo macho (derecha) tuvimos que fabricarlo de nuevo, ya que el suministrado no resultaba adecuado para erosionar: con nervios tan finos, la rugosidad era excesiva y hacía inviable el proceso.

En cuanto al electrodo hembra, izquierda, el rendimiento ha sido bastante correcto.

De cara a futuras fabricaciones, sería recomendable mejorar el acabado superficial de los electrodos. En un electrodo mecanizado es posible dejarlo pulido en unos 10 minutos con una lija fina; en este caso, fue necesario limar y pulir durante unas 2 horas para alcanzar un estado óptimo. Este sobretiempo tiene un impacto directo en coste operativo, y sería clave compararlo con el coste total de fabricación del electrodo mediante su tecnología frente al proceso CNC convencional.

Comportamiento en erosión

El electrodo ha trabajado muy bien. El desgaste ha sido bajo, incluso tratándose de operaciones sobre nervios donde es habitual una degradación mayor. El proceso ha sido estable y rápido.

Tiempos del proceso

El ciclo completo ha supuesto 5 horas:
2 horas de preparación y pulido del electrodo.
3 horas entre el centrado del cobre y la erosión.

Resulta destacable que la preparación y el pulido hayan consumido prácticamente el mismo tiempo que la propia erosión, cuando idealmente el pulido debería ser una tarea menor. Tal como comentamos, sería necesario analizar números comparativos para evaluar qué método es más eficiente en coste y tiempo.

AIDIMME Instituto Tecnológico
GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Innovación Industria, Comercio y Turismo
IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea

Parámetros de erosión

Los parámetros empleados fueron los siguientes:

Máquina: ONA Techno H 400

Z final erosionado: 29.4 mm

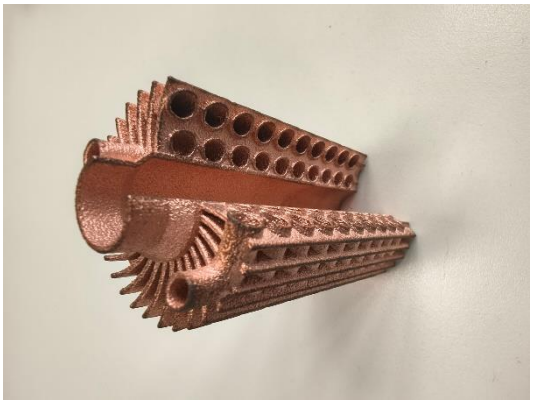
VDI 34	Z -29.2
VDI 31	Z -29.32 (R0.120)
VDI 28	Z -29.37 (R0.150)
VDI 26	Z -29.4 (R0.170)

Gap aplicado: 0.2 décimas por parte

3.1.5 UMESAL

Tras las comunicaciones con el departamento técnico, se llegó a la conclusión que, dentro de las características de la empresa, un corte de un disipador térmico sería de gran ayuda para que puedan determinar el potencial de esta tecnología y en un futuro próximo poder incorporarla a su gestión.

Se les fabricó el siguiente demostrador.



4. Resumen y conclusiones

Desarrollo de Demostradores

Se realizaron múltiples demostradores con sus características técnicas definidas a cada empresa, logrando elementos con alta densificación y buenas propiedades, cada empresa por sus características tiene requisitos diferentes en cuanto a acabado superficial, precisión, y geometría.

Sin embargo, en todos los casos requieren de una elevada densificación, alta conductividad eléctrica o térmica y geometrías complejas.

Se desarrollaron demostradores de acuerdo a los requerimientos de las empresas y estos fueron valorados y en algunos casos validados y ensayados en su entorno industrial

5. Conclusiones

Las principales conclusiones extraídas del estudio son:

El control de humedad es fundamental para la calidad del polvo de cobre.

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.

Los parámetros de proceso se adecúan para la fabricación de los diferentes demostradores, aun viniendo de empresas con diferencia en su estrategia de mercado.

La facilidad de extracción del polvo de los canales internos es una gran ventaja frente a PBF EB/M.

El acabado superficial obtenido por láser es un punto a favor frente al PBF EB/Mm

La rugosidad superficial fue un punto desfavorable en la fabricación de ánodos

Los demostradores fabricados y evaluados, cumplieron en gran medida con las expectativas de las empresas, pese a las deficiencias de acabado y o precisión, estas ya tienen en mente la incorporación de esta tecnología dentro de sus procesos.

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