ENTREGABLE E5.1

PROYECTOS—

2024-2025

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

"GREENLASER"

Entregable: E5.1 Demostradores realizados por PBF-LB/M Láser verde en titanio

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. ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO 1

2.1 TAREA 5.1 DESARROLLO DE PARÁMETROS DE TITANIO CON POLVO FINO Y POLVO GRUESO. 1

2.1.1 DESARROLLO DE AISLAMIENTO DEL POLVO. 2

2.1.2 DESARROLLO DEL EXPERIMENTAL PARA ENSAYAR EL TI6AL4V.....2

2.1.3 EXPERIMENTAL TI6AL4V.....3

3. EXPERIMENTAL POLVO GRUESO TI6AL4V 7

3.1 TAREA 5.2. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESPESOR DE CAPA EN LA DENSIFICACIÓN DE LAS PIEZAS DE TITANIO. 8

3.2 TAREA 5.3. DESARROLLO DE DEMOSTRADORES DE TITANIO POR PBF LB/M LÁSER VERDE. 10

FABRICACIÓN DEL ALTORRELIEVE.....10

4. RESULTADOS OBTENIDOS 12

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES 14

1. Introducción, objetivos del proyecto

Las tecnologías de lecho de polvo basadas en láser **(PBF.LB/M)** 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 esta última tiene una distribución de partículas de un tamaño menor, 20-63 um en lugar de 45-105 um utilizado por la PBF.EB/M.

Por otro lado, el espesor de capa utilizado en **PBF.LB/M** es también menor, sin embargo, esta tecnología tiene un tamaño del haz del láser hasta 32 veces mayor que en el caso del haz infrarrojo en área, es decir 5 veces mayor en diámetro.

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 y geometrías, elementos de interés en su propio sector.

2. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

Las actividades realizadas corresponden a **PT5 - Estudio de la procesabilidad de polvo de titanio con tecnología de láser verde.**

2.1 Tarea 5.1 Desarrollo de parámetros de titanio con Polvo fino y polvo grueso.

Por recomendaciones del fabricante de esta tecnología (TRUMPF) en la que sugiere que esta tecnología no se desarrolló para ser usada en Ti, ya que la reflexividad del Ti es similar a lo largo de todo el espectro de la luz, ver la aclaratoria en el apartado PT4.4 el final de la GL-019, en donde se explica como el fabricante no recomienda el empleo de esta tecnología para el Titanio. Adicionalmente indicaron que para el cambio de material no solo basta con una limpieza profunda de la máquina, sino que se requiere una intervención del personal desde Alemania y el cambio de varios filtros.

Aunque técnicamente es posible fundir titanio con un láser verde (longitud de onda de ~515-532 nm), no es la solución estándar por una razón de peso: se estaría pagando por resolver un problema que el titanio no tiene. Este razonamiento se fundamenta sobre tres pilares: Física de materiales, eficiencia energética y madurez tecnológica.

- Física: La curva de absorción del Titanio, que es el argumento principal a favor del láser verde en la industria es su capacidad para procesar metales altamente reflectantes

(como el cobre puro o el oro). En el caso del Cobre: El cobre refleja casi el 95% de la energía de un láser infrarrojo estándar (IR - 1064 nm), lo que hace imposible fundirlo sin una potencia desmesurada o sin dañar la óptica por el reflejo (retorno). El láser verde soluciona esto porque el cobre absorbe la luz verde 8 veces mejor que la infrarroja. En el caso del Titanio: El titanio (especialmente la aleación Ti6Al4V) es un material "oscuro" para el láser infrarrojo. Absorbe la energía IR de manera excelente (aproximadamente un 30-40% en estado sólido y mucho más al fundirse). Conclusión: No es necesario la longitud de onda verde para "acoplar" la energía en el titanio. El láser infrarrojo estándar ya es altamente eficiente para este material. Usar láser verde no aporta una mejora metalúrgica significativa que justifique el cambio.

- Economía y Eficiencia Energética Los láseres verdes son sustancialmente más complejos y costosos que los láseres de fibra de Iterbio (IR) que dominan el mercado. Al usar láser verde para titanio, se está aumentando el CAPEX (costo de la máquina) y el OPEX (costo de electricidad y mantenimiento) sin obtener una pieza mejor o más rápida.
- Complejidad y Mantenimiento. Los láseres de fibra infrarroja son conocidos como los "caballos de batalla" de la industria porque son robustos y de estado sólido monolítico. Mientras que el láser verde requiere de otros equipamientos que añaden componentes ópticos sensibles y complejos al sistema y lo convierten en más delicados ante cambios de temperatura y vibraciones. En un entorno industrial, un láser IR es mucho más fiable y barato de mantener.

Resumiendo: No se recomienda emplear láser verde para titanio porque es una solución de nicho para un problema de reflectividad que el titanio no padece. Representa un sobrecoste financiero y energético innecesario frente a la tecnología infrarroja, que es más madura, potente y eficiente.

2.1.1 Desarrollo de Aislamiento del polvo.

Ante la complejidad de realizar el cambio de material en esta máquina, se planteó la posibilidad de aislar parte de la maquina para poder realizar el experimental. Se plantearon varias alternativas, las cuales fueron consultadas con el personal técnico de GH y de Fluid and Thermal Managment, quienes aportaron sus ideas al respecto. La idea en principio era aislar tanto el tanque de alimentación como las salidas de descarga de polvo, pero existe el inconveniente de la recirculación de gases, los sensores y los filtros.
Se buscaron alternativas las cuales fueron infructíferas.

2.1.2 Desarrollo del experimental para ensayar el Ti6Al4V

Debido a que el aislamiento que se pensó no era viable, se decidió buscar otra alternativa para desarrollar los parámetros de fabricación para el Ti6Al4V.
Después de varios análisis y discusiones con expertos en el área, incluyendo el departamento técnico de GH, se ha diseñado una estrategia para ensayar la procesabilidad del polvo de titanio sin comprometer la funcionalidad y fiabilidad de la máquina.

2.1.3 Experimental Ti6Al4V

A pesar de las recomendaciones del fabricante del equipo (TRUMPF) en contra de su uso para materiales de baja absorción en el espectro del láser verde, y con el objetivo de caracterizar la viabilidad técnica y determinar las limitaciones inherentes de la tecnología en un material de alto valor como el titanio, se decidió llevar a cabo un riguroso estudio experimental empleando polvo de Ti6Al4V con una granulometría fina de 15 ~ 45 µm.

En los procesos de fabricación aditiva por fusión de lecho de polvo, la interacción entre el haz de láser y el material particulado está condicionada por la profundidad del sustrato o de la capa previa. La transferencia de calor y la formación del “charco de fusión" (melt pool) varían drásticamente cuando el espesor del material cambia.

Para garantizar la integridad estructural y evitar defectos como la falta de fusión o el "balling" (formación de esferas), es imperativo determinar cómo se comporta el material en diferentes geometrías de deposición.

El desarrollo de la bandeja especial de fabricación se ha llevado a cabo en tres etapas incrementales, cada una diseñada para aislar variables específicas:

Inicialmente se pensó en un análisis de Penetración Lineal (Ranuras de Profundidad Variable) El primer diseño consistió en ranuras con profundidades graduales. El objetivo era observar la capacidad del haz de láser para fundir material en un trazo continuo a medida que aumentaba el espesor del polvo. Esto permitiría identificar el límite crítico de profundidad donde el láser pierde eficacia de penetración.
Sin embargo, esto no reflejaría el comportamiento real en la fusión de una capa.

Entonces, se evolucionó hacia un diseño de agujeros. A diferencia de las ranuras, estos permitirían evaluar la estrategia de escaneo convencional (tramado o hatching). El propósito fue validar si los patrones de movimiento del láser en áreas cerradas mantenían la homogeneidad de la fusión al variar la profundidad, sin la restricción longitudinal de una ranura.

Tras diferentes discusiones y análisis se realizó el diseño final, que consiste en una bandeja de pruebas optimizada con una matriz de 16 agujeros donde cada fila posee agujeros con profundidades de 40, 60, 80 y 100 µm. Esta configuración permite un análisis estadístico robusto al cruzar dos dimensiones críticas:

Variables de Proceso: Evaluación de 4 configuraciones distintas (ej. potencia de láser, velocidad de escaneo, o tipo de material).

Profundidad: 4 niveles de espesor de capa.

De esta manera se puede determinar las posibles Ventanas de Proceso: Identificar la combinación óptima de parámetros que permitan una fusión completa en aquellos espesores que funcione.

Así se centraliza en una sola impresión 16 condiciones experimentales distintas, sin necesidad

de realizar múltiples capas lo que conlleva a contaminar la maquina con otro polvo.

Este experimental se diseñó como un ensayo multifacético destinado a cubrir varios aspectos críticos de la procesabilidad de un material en la fabricación aditiva por Fusión Láser en Lecho de Polvo sobre Metal (PBF-LB/M).

Diseño Experimental: Caracterización de la Fusión de Capa
Para el análisis de la capacidad de fusión del láser verde en el Ti6Al4V, el diseño experimental incorporó una placa de fabricación que contenía un arreglo de varios agujeros en bajorrelieve (o cavidades) mecanizados con precisión.

La característica clave de este diseño es que estos bajorrelieves presentaban diferentes profundidades de referencia, las cuales variaban sistemáticamente: 0.04 mm, 0.06 mm, 0.08 mm y 0.1 mm.

El propósito de esta disposición era doble:

- Analizar la Profundidad de Penetración de la Fusión (Melt Pool Depth): Mediante la observación microscópica de las zonas donde el láser pasaba sobre estos bajorrelieves rellenos de polvo, se pretendía determinar la profundidad mínima de cavidad que el láser era capaz de fundir completamente en una sola capa de polvo. Esto actúa como un indicador directo de la capacidad del láser verde para garantizar la consolidación vertical de las capas.
- Evaluar la Interacción Polvo/Sustrato: El experimento buscaba entender si la energía transferida era suficiente para fundir de manera consistente y uniforme la capa de polvo sobre la superficie metálica sólida subyacente.

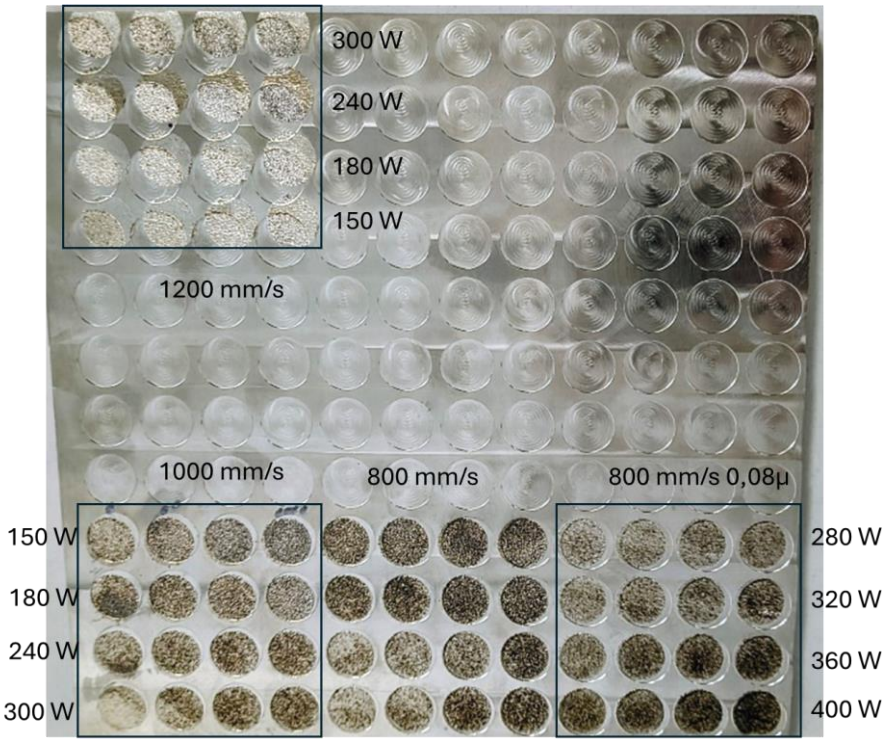
Variables Fundamentales Evaluadas
En este estudio de viabilidad, se evaluaron las tres variables fundamentales que controlan la densidad de energía aportada en el proceso PBF-LB/M:

- Potencia del Haz (P): La cantidad de energía de salida del láser.
- Velocidad del Haz (v): La rapidez con la que el láser se desplaza sobre el lecho de polvo.
- Salto entre Líneas (h, Hatch Spacing): La distancia transversal entre los sucesivos rastros del láser.

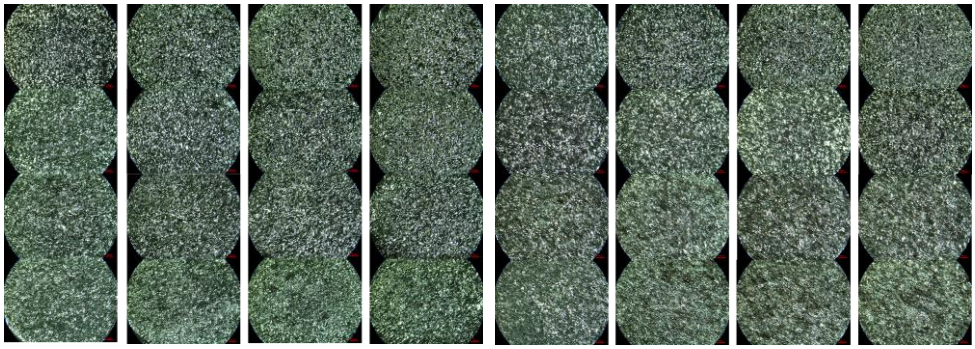
Estrategia Energética Basada en la Reflectividad
A pesar de ser un láser verde, se tomó como punto de partida una hipótesis clave: la reflectividad del Titanio (Ti6Al4V) en el rango del láser verde es similar a su reflectividad en el rango del láser infrarrojo (la tecnología estándar para Ti). Basándose en esta premisa, la energía inicial para los ensayos se estableció a partir de los valores típicamente empleados en sistemas de láser infrarrojo. A partir de esta base, se diseñó una matriz de experimentación que evaluaba sistemáticamente tanto valores de energía mayores como menores que esta referencia inicial, buscando el nivel de energía volumétrica que permitiera una fusión estable del Ti6Al4V con el láser verde.

Este experimental fue crucial para obtener datos empíricos que en dado caso permitirán fabricar

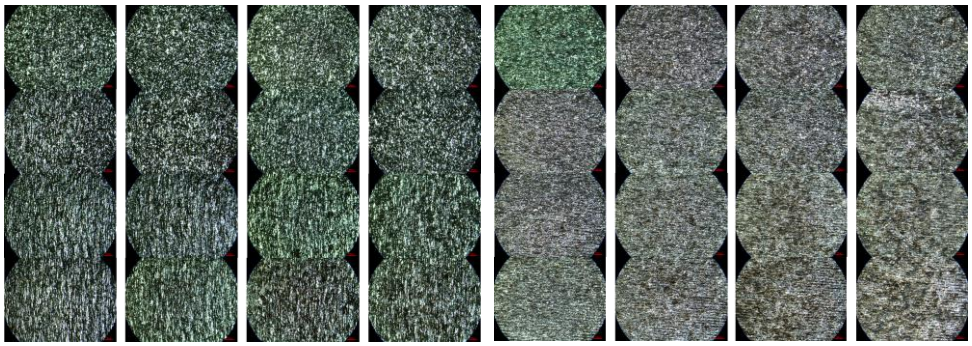
piezas concretas en Ti6Al4V.



Bandeja de fabricación de Ti6Al4V 15~45µm GL-037



(1200mm/s 150,180, 240, 300W 0.12µ) (1000mm/s 150,180, 240, 300W 0.12µ)



(800mm/s 150,180, 240, 300W 0.08µ) (800mm/s 280,320, 360, 400W 0.08µ)

Micrografías de la superficie obtenida

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

El análisis detallado de las micrografías obtenidas a partir del estudio de viabilidad en Ti6Al4V fue fundamental para entender la interacción del láser verde con este material. Estas observaciones directas permitieron correlacionar los parámetros del proceso con la calidad de la fusión. Identificación de Parámetros Óptimos para el Láser Verde.
Las micrografías de detalle revelaron que el mejor acabado superficial, considerado un indicador aproximado de una fusión completa y estable, se logró con la combinación de parámetros del grupo 4, específicamente en la imagen inferior derecha, la esquina inferior izquierda.
Los parámetros que produjeron este superior resultado fueron:

- Potencia: 400 W
- Velocidad: 800 mm/s
- Espaciamiento del Hatch 0.8µm

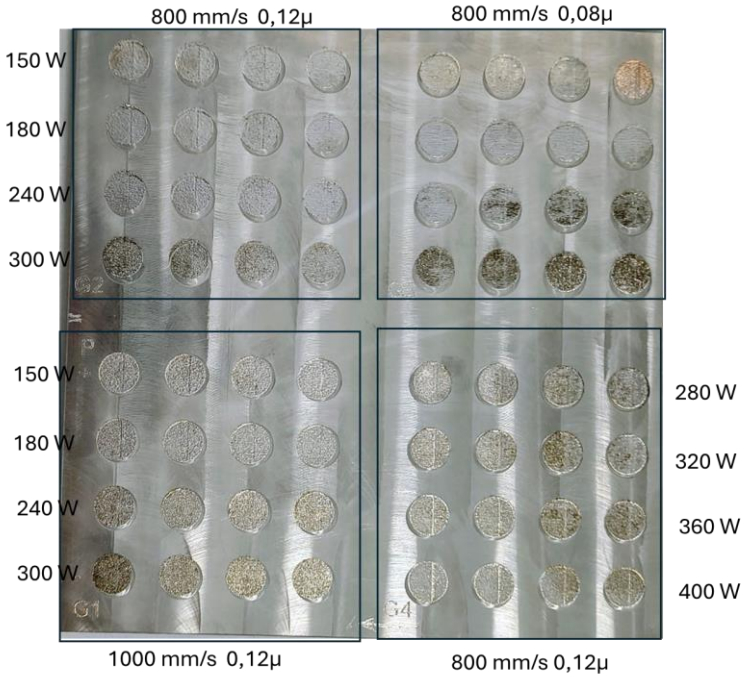
Al comparar estos parámetros óptimos del láser verde con los valores típicos empleados en la fabricación de Ti6Al4V con láser infrarrojo (tradicional), se observa una diferencia crítica en la aportación de energía:

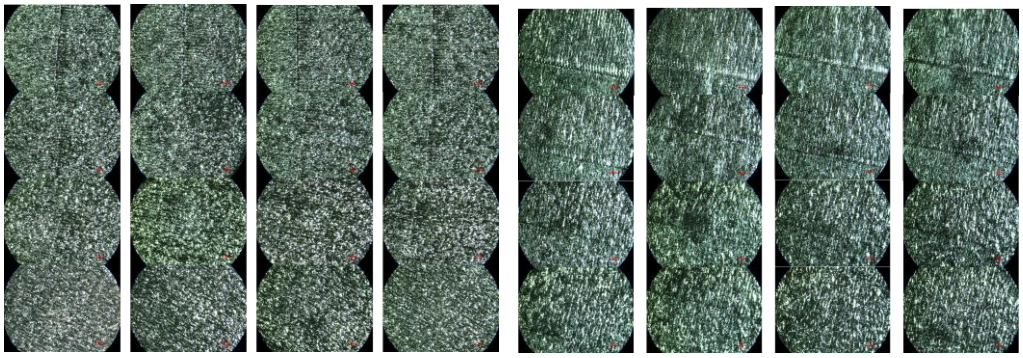
Parámetro	Láser Verde (Óptimo Experimental)	Láser Infrarrojo (Referencia)
Potencia	400 W	180 W
Velocidad	800 mm/s	1000 mm/s
Espaciamiento	0.08 µm	0.08 µm

Se puede inferir claramente que el láser verde requiere una potencia significativamente mayor (400 W frente a 180 W) para lograr un nivel de fusión comparable en el Ti6Al4V. Esta diferencia abismal en la potencia requerida se explica por un detalle fundamental en la óptica de los sistemas: el tamaño del spot o diámetro del haz láser. Láser Infrarrojo: El tamaño del haz es de aproximadamente 35 a 50 micrómetros (µm). Láser Verde (Equipo TRUMPF): El tamaño del haz es considerablemente mayor 210 µm. Impacto en la Densidad de Energía. Dado que la energía se distribuye sobre un área (A) y la densidad de energía volumétrica E_v es un factor clave en la fusión, la gran diferencia en el área del spot es la razón principal de la disparidad de potencia. Al ser el spot del láser verde mucho más grande, la potencia se dispersa sobre un área mayor, concentrando mucho menos la energía por unidad de superficie en comparación con el láser infrarrojo.
Para compensar la menor densidad de energía resultante de un spot de 210 µm (que tiene un área aproximadamente 17 veces mayor que un spot de 50 µm), el sistema de láser verde necesita inyectar una potencia bruta mucho más alta (400 W) para alcanzar el umbral de fusión del Ti6Al4V. Esto confirma que, aunque el láser verde pueda lograr la fusión en Ti6Al4V, lo hace de manera menos eficiente energéticamente debido a las características ópticas de este equipo específico.

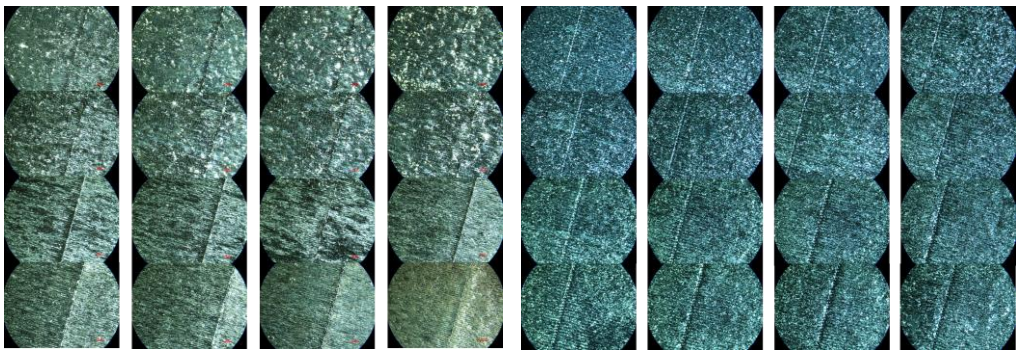
3. Experimental Polvo grueso Ti6Al4V

Para cumplir con los objetivos planteados en la presentación del proyecto, se plantea el estudio de los parámetros de fusión del Ti6Al4V con granulometría mayor 45 ~ 105µm, para ello, se realizó un experimental análogo al llevado a cabo con el Ti6Al4V, pero esta vez empleando polvo con una mayor granulometría (45 ~ 105 µm). El objetivo primordial de este ensayo fue corroborar si los parámetros de alta energía identificados en fases previas seguían siendo los más eficientes, incluso con un tamaño de partícula considerablemente mayor.





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



Diseño Experimental y Variables Clave:
Se utilizó una placa de fabricación similar a la del ensayo de titanio 15 ~ 45 µm, que permitía evaluar la penetración de la fusión en una sola capa. Esta placa presentaba las cápsulas o bajorrelieves (cavidades mecanizadas) con las profundidades de referencia: 0.04 mm, 0.06 mm, 0.08 mm y 0.1 mm.

La matriz experimental para este polvo grueso se configuró con una combinación de cuatro variables principales:

- Velocidades del Haz (v): Se ensayaron 1000 mm/s y 800 mm/s.
- Potencias del Haz (P): Se variaron en un amplio rango, desde 150 W hasta 400 W.
- Espaciado entre Líneas (Hatch Spacing, h): Se probaron dos valores característicos de la tecnología de láser verde: 0.08 µm y 0.12 µm.
- El análisis de la profundidad de las cápsulas fundidas permitió determinar la profundidad máxima que el láser es capaz de consolidar en una única pasada sobre el polvo grueso, un factor crítico para garantizar la densificación capa a capa.

Conclusiones de la Calidad Superficial
Las fotomicrografías de las superficies obtenidas tras la fusión pusieron de manifiesto un patrón consistente con los hallazgos anteriores, reforzando la necesidad de alta energía:

Se comprobó que la combinación de mayor potencia y la menor velocidad de escaneo es la que genera el mejor acabado superficial.

Este acabado superficial de alta calidad se interpreta como un indicador robusto de una buena fusión y consolidación del material, minimizando la presencia de porosidad superficial y el fenómeno de balling (aglomeración de partículas). Este resultado sugiere que, para contrarrestar tanto la conductividad térmica del Ti6Al4V como el aumento de la inercia térmica del polvo grueso, es esencial maximizar la aportación de energía volumétrica y el tiempo de interacción entre el láser y la partícula fundida.

3.1 Tarea 5.2. Estudio de la Influencia del espesor de capa en la densificación de las piezas de titanio.

Como parte integral de este experimental de caracterización con polvo de Ti6Al4V, y con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso sin comprometer la calidad, se evaluó de manera

crucial la influencia del espesor de capa en la estabilidad y la calidad de la fusión del lecho de polvo.

Para esta evaluación, se manipuló la profundidad del lecho de polvo utilizando las cápsulas o bajorrelieves mecanizados en la placa de construcción. Se ensayaron diferentes profundidades, que oscilaron desde 0.04 mm (el espesor de capa estándar para este material y tecnología) hasta 0.1 mm (un espesor dos veces y media mayor que el estándar). El incremento del espesor de capa se buscaba para acelerar el tiempo de fabricación total por pieza, si la calidad lo permitía.

Análisis Comparativo por Espesor de Capa
La observación detallada de las micrografías de las superficies fundidas, manteniendo constantes los parámetros de máxima potencia (400 W) y mínima velocidad (800 mm/s) (la combinación óptima para la energía), reveló un deterioro progresivo y marcado en la calidad de la fusión conforme aumentaba el espesor de la capa:

Espesor de 0.04 mm (Estándar): En el espesor estándar, la alta energía aplicada logra una fusión eficiente y completa. Las micrografías muestran líneas de fusión claramente definidas y uniformes, con un acabado superficial liso y una mínima porosidad. Este es el resultado deseado, indicando una buena absorción de energía y consolidación.

Espesor de 0.06 mm: Con este ligero incremento, la calidad de la fusión comienza a degradarse. Las líneas de fusión pierden definición y nitidez, volviéndose más anchas e irregulares. Esto sugiere que la energía aportada por el láser, aunque alta, ya no es suficiente para fundir completamente la mayor masa de polvo en la capa, llevando a una reducción en la densidad volumétrica de energía efectiva.

Espesor de 0.1 mm (Máximo): El aumento al espesor de 0.1 mm resultó ser crítico. La superficie fundida se distorsiona claramente, mostrando un acabado tosco y una severa falta de definición de las líneas de escaneo. Se advierte la aparición de aglomerados de material (balling) y, lo más crítico, posibles zonas sin fusión o falta de consolidación. Esta condición compromete la estanqueidad y las propiedades mecánicas finales del componente, debido a la porosidad excesiva y la inestabilidad de la superficie de la capa.

La conclusión de este análisis es que, aunque el aumento de la potencia puede compensar el alto punto de fusión del Ti6Al4V, no puede compensar eficazmente un espesor de capa excesivo. Para la fabricación de componentes funcionales y estancos con esta tecnología, es imperativo mantener el espesor de capa cerca del valor estándar de 0.04 mm para asegurar la calidad y la integridad de la pieza.


Espesor de 0.04mm


Espesor de 0.06mm


Espesor de 0.1 mm

Como se puede apreciar en esta imagen la fusión del polvo tiene una influencia directa al espesor de capa a fundir, por lo que si en un futuro se pretende emplear el láser verde en titanio se tendría que partir de los valores de energía aquí evaluados y plantearse un estudio para desarrollar los demás parámetros requeridos.

3.2 Tarea 5.3. Desarrollo de demostradores de Titanio por PBF LB/M Láser Verde.

Para la validación final de los hallazgos obtenidos en la caracterización de la profundidad de fusión, y como una prueba de concepto concluyente sobre la viabilidad a largo plazo de emplear esta tecnología de láser verde en Ti6Al4V, se procedió a la fabricación de un demostrador multicapa. Este ensayo se realizó a pesar de la reorientación del proyecto hacia el Cobre, sirviendo como un estudio prospectivo. En esta tarea contamos con la ayuda del departamento técnico de GH Induction quien nos aportó ideas de posibles demostradores planos.

Fabricación del Altorrelieve

Tras consultar con el equipo técnico de GH, quienes sugirieron la posibilidad de realizar un demostrador plano donde se ponga en evidencia la procesabilidad del titanio en esta tecnología.

Partiendo de esa idea, se diseñó un demostrador en altorrelieve, el cual consistió en la deposición controlada de cuatro capas sucesivas de Ti6Al4V, mejorando la idea del demostrador plano. Para este ensayo, se eligió deliberadamente un espesor de capa de 0.1 mm, un valor que representa un desafío significativo y una alta tasa de deposición. La energía del láser se ajustó a los parámetros óptimos de alta potencia y baja velocidad identificados en la fase de caracterización de capa simple.

El resultado fue la generación exitosa de un altorrelieve con una altura total superior a 0.5 mm.

Resultados y Viabilidad a Futuro
La observación detallada del demostrador permitió confirmar los siguientes puntos críticos:

Correcta Fusión Intercapa: Se constató la correcta fusión y consolidación de las distintas capas depositadas. Esto indica que, bajo los parámetros energéticos ajustados (400 W, 800 mm/s), el láser verde sí es capaz de fundir y consolidar el polvo de Ti6Al4V, logrando la adhesión entre capas y la construcción vertical de la geometría.

Integridad Estructural: El hecho de haber logrado un altorrelieve de más de medio milímetro de altura demuestra la viabilidad estructural básica del proceso para este material.

Limitaciones y Proyección a Futuro
Si bien la fusión intercapa fue exitosa, el acabado superficial del altorrelieve no fue completamente lisa. Esta aspereza superficial es un indicador de la inestabilidad latente en el baño de fusión (melt pool) y la dificultad para mantener la uniformidad con un espesor de capa tan elevado.

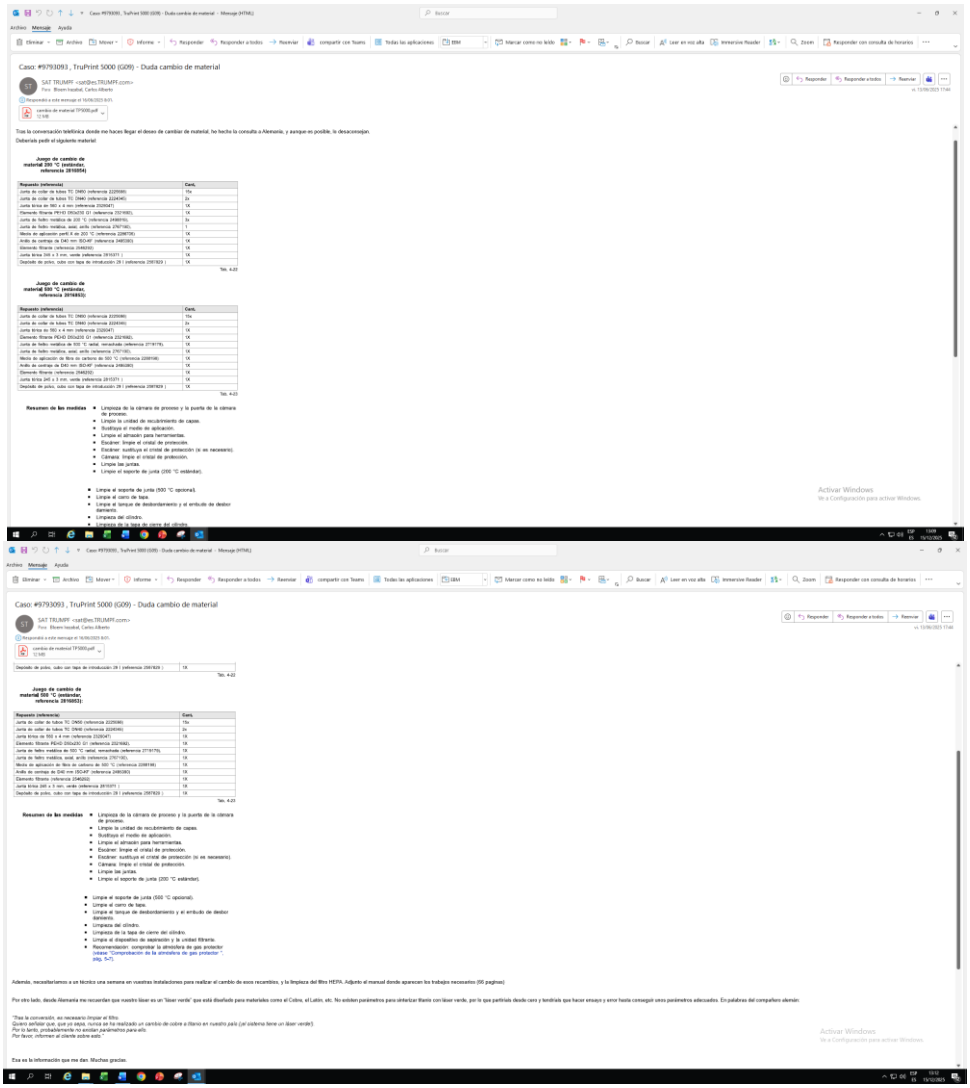
No obstante, esta prueba de concepto finaliza con una nota positiva: el experimental demuestra la viabilidad de emplear esta tecnología con Ti6Al4V en el futuro. Aunque actualmente el proceso no es lo suficientemente maduro o eficiente para la producción en serie (debido a la necesidad de alta potencia y el acabado superficial), los resultados prueban que existe un potencial de procesabilidad. Una investigación futura, enfocada en la optimización del diámetro del haz (spot size), la absorción mediante aditivos, o la implementación de precalentamiento, podría permitir que esta tecnología se convierta en una opción válida para el Titanio.



Demostrador de un altorrelieve multicapa de 0,5 mm.

4. Resultados obtenidos

Como ya se ha mencionado, el láser verde no presenta ventajas en el procesado del titanio, y la complejidad del equipo para el cambio de material tal como lo indica el personal del fabricante.



Capturas de los correos enviados por TRUMPF

Esta comunicación se evaluó y tras diferentes intentos de aislar la máquina, sellando aperturas, colocando barreras físicas que vimos viables pero infructuosas, finalmente, tras evaluar con diferentes fuentes y empresas colaboradoras, (GH Induction y Fluid and Thermal Managment S.L.), se decidió realizar un experimental en el que no haya necesidad de reparto de polvo y al a vez poder evaluar la fusión con diferentes espesores, se realizaron un par de placas con una serie de orificios con diferentes espesores que emulen el espesor de placa, estos orificios se repitieron tantas veces como variables se deseaban evaluar, así, de esta manera poder cumplir con los objetivos planteados.

Los resultados obtenidos como función de los objetivos planteados dentro del proyecto son los

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

siguientes:

- Obtención de los parámetros de fabricación con polvo fino de una aleación de titanio en piezas tanto de pared fina como elementos másicos.
  De manera análoga a la antes expuesta se consiguió fundir con 400W y un espaciamiento de 0.08 µm, se logra fundir capas de 0.04 y 0.06 mm
- Obtención de los parámetros de fabricación con polvo grueso de una aleación de titanio de piezas con geometrías básicas.
  Se realizó un experimental en donde se obtuvo diferentes parámetros de fusión determinándose que hasta 0,06mm se puede fundir con precisión el Ti6Al4V con polvo grueso.
- Interactuar con las empresas comprometidas en el desarrollo de demostradores que potencien su aplicabilidad, proponiendo piezas, elementos de interés en su propio sector.
  Las empresas entendieron la dificultad que presenta el equipo y se enfocaron al desarrollo de demostradores con aplicabilidad industrial en Cu.
  Sin embargo se fabricó un altorrelieve en Ti6Al4V que de alguna manara valida la viabilidad de esta tecnología en Ti64.

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

5. Resumen y conclusiones

En ese paquete de trabajo han colaborado activamente GH Induction y Fluid and thermal management S.L. aportando sus conocimientos de equipos, fluidos y sus flujos entre otros durante las pruebas y diseños de sistemas que permitiesen emplear el Ti en esta máquina sin tener que realizar los cambios que indicó el fabricante.

Se han obtenidos las condiciones de proceso para fabricar el Ti6Al4V en láser verde, gracias al apoyo de las empresas colaboradoras tanto para polvo fino, como para polvo grueso, se ha demostrado que el espesor de capas juega un papel importante en la densificación, en este caso dada la elevada energía requerida para fundir el titanio, espesores de capa superiores a 0.06mm no son recomendados.

El público objetivo en el caso del titanio es la industria aeroespacial por excelencia, por su elevada relación peso-resistencia, seguida de la industria clínica, dental y biomédica por su biocompatibilidad y su facilidad de ser personalizable a medida finalmente la automotriz, equipos deportivos de altas prestaciones y todas aquellas que requieren de alta resistencia con bajo peso.

El estudio evalúa la viabilidad técnica de utilizar láser verde para procesar aleaciones de Titanio (Ti6Al4V) en tecnología de Fusión Láser en Lecho de Polvo (PBF-LB/M), desafiando las recomendaciones iniciales del fabricante (TRUMPF). Se realizaron ensayos experimentales con dos tipos de granulometría de polvo: fina (15-45 µm) y gruesa (45-105 µm).

El diseño experimental utilizó placas con bajorrelieves de distintas profundidades (0.04 a 0.1 mm) para medir la profundidad de penetración de la fusión (Melt Pool Depth) y la interacción entre el polvo y el sustrato. Se analizaron tres variables críticas: potencia, velocidad y espaciamiento entre líneas (hatch spacing).

La investigación partió de la hipótesis de que la reflectividad del titanio en el espectro verde es similar al infrarrojo, pero descubrió que las diferencias en la configuración óptica del equipo (específicamente el tamaño del haz) alteran drásticamente los requisitos de energía.

Conclusiones Principales

- Necesidad de Alta Potencia: El láser verde requiere una potencia significativamente mayor que el láser infrarrojo tradicional para obtener resultados similares. Mientras que el infrarrojo opera eficazmente a 180 W, el láser verde necesitó 400 W.

- Impacto del Tamaño del Spot: La menor eficiencia energética del láser verde en este equipo se debe a que su haz es mucho más grande (210 µm) frente al del infrarrojo (35-50 µm). Al dispersarse la energía en un área 17 veces mayor, es obligatorio aumentar la potencia bruta para alcanzar el umbral de fusión.

- Parámetros Óptimos Identificados: Se determinó que la mejor calidad de fusión y acabado superficial (indicador de consolidación completa y ausencia de balling) se logra con:

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

- Potencia: 400 W
- Velocidad: 800 mm/s
- Hatch Spacing: 0.08 µm

- Independencia de la Granulometría: 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.

- Viabilidad Técnica Demostrada: 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).

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