

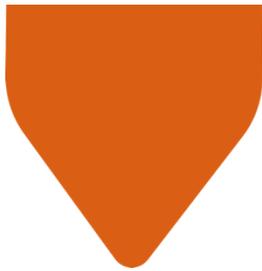
Interreg



Sudoe

ADDITool

European Regional Development Fund



D.2.2.1. INFORME DE RESULTADOS DE LA FABRICACIÓN

FECHA: 17/04/2023

www.additool.eu

Contenido

INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVO	3
DESCRIPCIÓN	3
RESULTADOS	4
Pilot FR1-LAUAK	4
Pilot PT1-MOLDETIPO	24
Pilot SP1-MEUPE/INESPASA	27
Pilot FR2-SOMOCAP	36
Pilot PT2-VIDRIMOLDE	49

INTRODUCCIÓN

El paquete de trabajo 2 (PT2) del proyecto ADDITool con Título: *Transferencia y demostración de tecnologías FAM para el sector del utillaje* proponía desarrollar y fabricar 5 pilotos para transferir las tecnologías de FA a las PYMEs del sector del utillaje en el SUDOE. En la Actividad 2.2: *Fabricación, post-procesamiento y caracterización de los demostradores*, todos los socios han trabajado conjuntamente para desarrollar 5 pilotos.

En este entregable se explican todos los resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas en los 5 pilotos.

OBJETIVO

El objetivo principal de este documento es recoger los resultados obtenidos en la fase de investigación industrial del Proyecto ADDITool continuando con la información detallada en el E.1.3.1. Conjunto de casos de estudio.

DESCRIPCIÓN

Durante esta tarea, se han desarrollado 5 pilotos atendiendo a los Términos de Referencia definidos en la Actividad 1.3. Cada piloto ha sido liderado por diferentes centros tecnológicos, utilizando diferentes tecnologías y materiales para cubrir diferentes intereses industriales. Se hizo una combinación entre los centros y las tecnologías para desarrollar pilotos interesantes para la transferencia de las tecnologías de FA. Los resultados se resumen en las siguientes etapas: fabricación, post procesado y caracterización.

En la Tabla 1, se detallan las tecnologías seleccionadas, los participantes y el líder de cada piloto.

Tabla 1. Piloto, empresa proponente del caso de uso, líder y participantes de cada piloto.

Participantes	FR1 LAUAK	PT1 MOLDETIPO	SP1 MEUPE/INESPASA	FR2 SOMOCAP	PT2 VIDRIMOLDE
ESTIA	LÍDER				
CEIT					
LORTEK				LÍDER	
UPV/EHU					
CATEC			LÍDER		

IPLEIRA		LÍDER			LÍDER
CEFAMOL					
ENIT					

RESULTADOS

Piloto FR1-LAUAK

DED HILO LASER

Antes de la fabricación de la pieza, es importante establecer todo el conjunto de parámetros de fabricación con el material 15CDV6 y la tecnología DED Hilo Laser teniendo en cuenta al menos:

- Potencia del Laser
- Velocidad del hilo
- Velocidad de soldadura

Y además:

- Densidad de energía másica (DME)
- Densidad de energía superficial (DSE)
- Energía por unidad de longitud (DLE)

SUIVI D'ESSAI - PRECITEC												
Date	04/05/22		Opérateur(s)		VP	PS	PD					
Heure	11:40											
Machine	COMAU		Matériau		15CDV6							
Numéro fiche			22XX		Densité (g/cm ³)		8,12					
Numéro d'affaire/projet			ADDITool		Diamètre fil (mm)		1,2					
Numéro substrat			/		Dimension substrat (mm)		150x150x5					
Référence matière			/		Dimension pièce (mm)		/					
Préparation du substrat			Sablage		Inertage (PPM O ₂)		Début essais		/			
Objectif			Recherche de paramètres procédé pour le 15CDV6		Distance focale (couronne/substrat)		Fin essais		/			
Opération de vérification			Centrage laser/fil		Oui	Répartition de puissance		Oui	Redresseur			
								Oui	Non			
												
Observations et commentaires										Validation (OK, NOK)		
ADDITool_C1	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	1,50	0,83	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar et distance retract : 3mm	OK
ADDITool_C2	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2	1,10	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar et distance retract : 4mm DEFAULT: pas de retract et fil sorti du redresseur santé CORDON : largeur variable	NOK
ADDITool_C3	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar + distance 4mm. Rajout d'une tempo 0,2s entre wireStop et laserStop	OK
ADDITool_C4	Cordon de 50mm	3000	1250	0,021	2,00	1,10	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar + distance 4 mm + tempo 0,2s DEFAULT : variation largeur cordon	OK
ADDITool_C5	Cordon de 50mm	3000	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar + distance 4 mm + tempo 0,2s DEFAULT : boule. Fil trop bas au départ.	NOK
ADDITool_C6	Cordon de 50mm	3000	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar + distance 4 mm + tempo 0,2s DEFAULT : trop d'apport de fil	NOK
ADDITool_C7	Cordon de 50mm	3500	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +16,6% légère boule sur la fin et légères irrégularités dans le cordon	OK
ADDITool_C8	Cordon de 50mm	3750	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +25%	OK
ADDITool_C9	Cordon de 50mm	4000	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +33,3%	OK
ADDITool_C10	Cordon de 50mm	4000	1500	0,025	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s	OK
ADDITool_C11	Cordon de 50mm	5000	1500	0,025	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s + 1000W de puissance en +	OK
ADDITool_C12	Cordon de 50mm	5500	1500	0,025	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s + 1500W de puissance en +	OK
ADDITool_C13	Cordon de 50mm	5500	1500	0,025	4,00	2,20	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm DEFAULT : apport de fil trop important, plage du fil en amont des galets redresseurs	NOK
ADDITool_MF1	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	parametrie C3 DEFAULT : fil bloqué dans le dévidoir	NOK
ADDITool_MF2	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	parametrie C3 mur très insatisfaisant sans raison valable	NOK
ADDITool_C14	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm parametrie C3 pas de tir. Laser non prêt	NOK
ADDITool_C15	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm parametrie C3 pas de tir. Laser non prêt	NOK
ADDITool_C16	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm parametrie C3 parfait	OK
ADDITool_MF3	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	parametrie C3 DEFAULT : boule sur fil à mi-cordon à la 3 eme couche	NOK
ADDITool_MF4	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	parametrie C3 DEFAULT : boule sur fil à la 2eme couche	NOK
ADDITool_MF5	Mur fin	2500	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	diminution de la puissance laser DEFAULT : goutte fil a cause du redresseur	NOK
ADDITool_MF6	Mur fin	2750	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	augmentation puissance laser DEFAULT : goutte	NOK

Figura 1. Búsqueda de parámetros.

El primer paso permitirá encontrar el cordón de soldadura más apropiado para fabricar la pieza y 4 paredes para caracterización con las siguientes dimensiones:

- 115 x 15 x 95mm
- 80 x 20 x 100mm
- 100 x 20 x 90mm
- 85 x 25 x 50mm

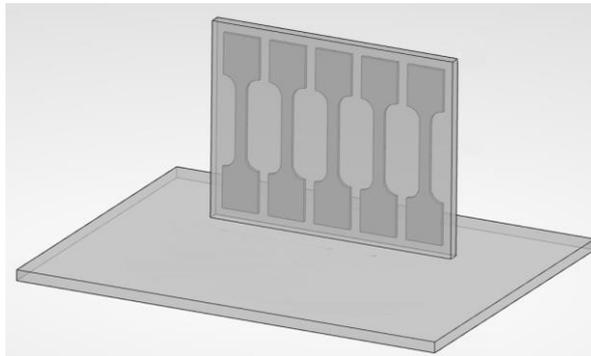


Figura 2. Pared para caracterización.

La caracterización proveerá de datos de acuerdo a:

- Gradiente microestructural
- Dureza
- Propiedades a tracción en la orientación vertical
- Propiedades a tracción en la orientación horizontal
- Etc.

Todos los resultados de la microestructura y ensayos mecánicos están disponibles en el entregable E.2.1.1.: Informe de materiales para la FAM.

En cuanto a la búsqueda de parámetros, el material 15CDV6 presenta problemas de oxidación lo que genera numerosas salpicaduras durante la deposición láser. Se hizo una modificación del cabezal de PRECITEC para mejorar la protección de gas y proteger así el cordón de soldadura.

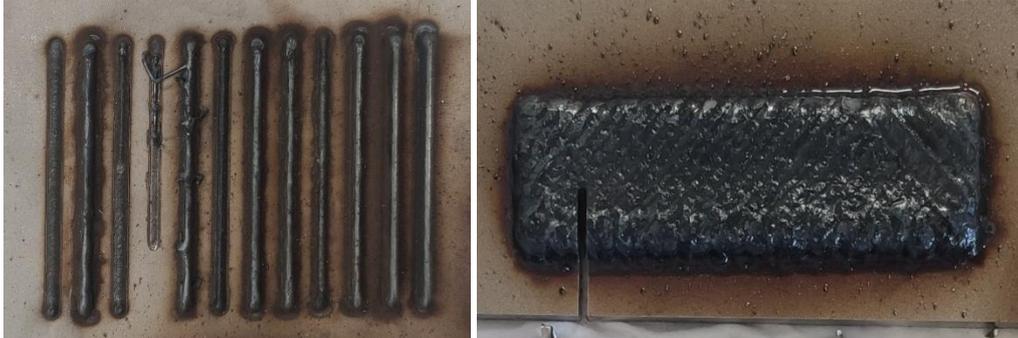


Figura 3. Oxidación y salpicaduras.

El efecto de la protección de gas (local y global) ha influido en la deposición y en los parámetros. Cuanto mayor es la protección, más refleja el material el láser lo que hace necesario aumentar la potencia.

Sin embargo, con una potencia de láser demasiado elevada, puede ocurrir sublimación generando humos que pueden contaminar el efector. Por tanto, es importante encontrar los límites seguros del proceso y establecer una ventana de trabajo.

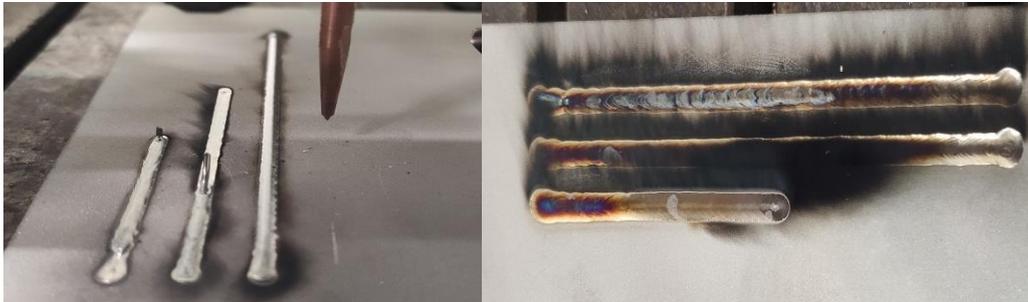


Figura 4. Sublimación del material.

En términos de deposición, la estrategia también influye en el aspecto geométrico, así como en la microestructura.

Para esta deposición, para evitar la porosidad o defectos superficiales, se han desarrollado las siguientes estrategias:

- 0° longitudinal ida y vuelta
- +45°/-45° con contorno
- +45°/-45° sin contorno
- -135°/+120°/-45°/+60°/45°/-60°/135°/-120° sin contorno para evitar defectos superficiales

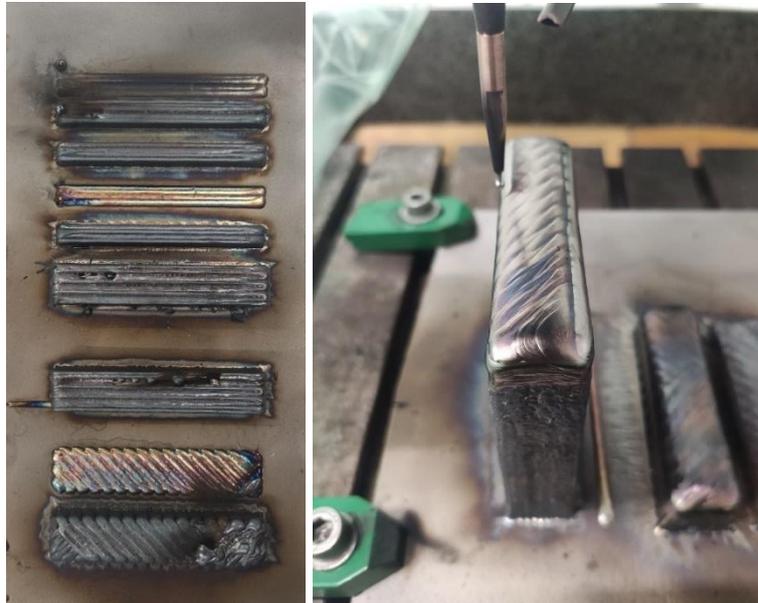


Figura 5. Influencia de la estrategia de deposición.

El uso de contorno puede impedir la obtención de una superficie homogénea en la parte superior y suponer un problema con distancia entre la boquilla y la pieza durante el crecimiento de la pieza. Una diferencia considerable entre la altura del contorno y el relleno puede incrementar la distancia de la boquilla a la pieza y generar paradas en el proceso.



Figura 6. Ejemplo sin contorno.

Una vez establecidos todos los parámetros, se realiza un rediseño para obtener una pieza con forma cercana a la final.

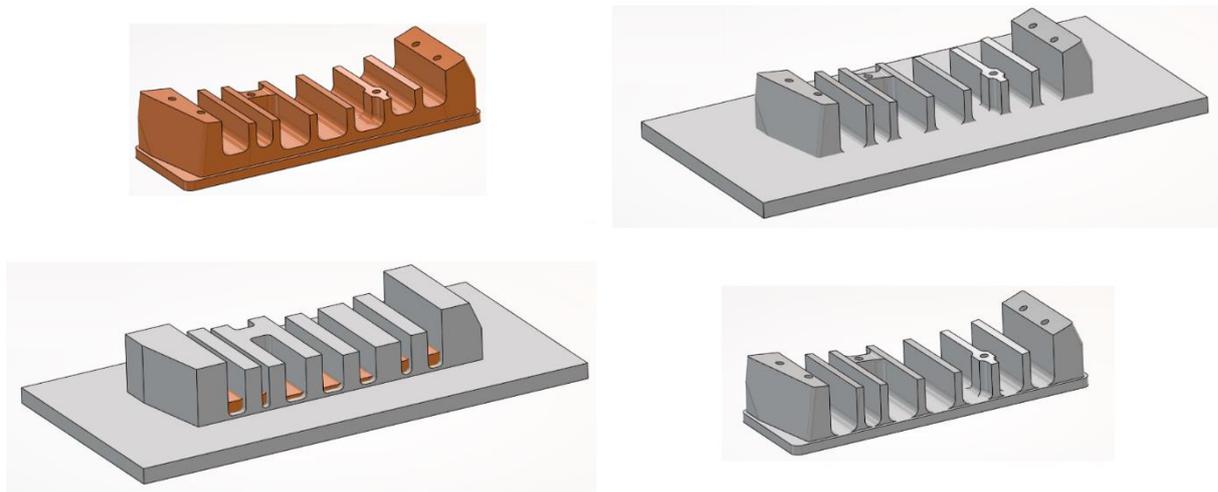


Figura 7 : Forma cercana a la final.

La fabricación de esta pieza se hizo con:

- Robot COMAU NJ165
- PRECITEC CoaxPrinter
- Hilo SelectArc 15CDV6 – Diámetro 1,2 mm.



Figura 8. Fabricación de la pieza cercana a la final con DED hilo láser.

Una vez finalizada la fabricación, se realizó un escaneado 3D para ver la desviación entre el CAD y la realidad. El escaneado se ha realizado antes y después del tratamiento térmico.

Se le aplicó un TT de relajación de tensiones durante 8 horas a 400 °C.

- Máxima desviación entre el CAD y la forma cercana a la final: 1,8 mm
- Máxima desviación entre la forma cercana a la final antes y después del TT: 0,204 mm

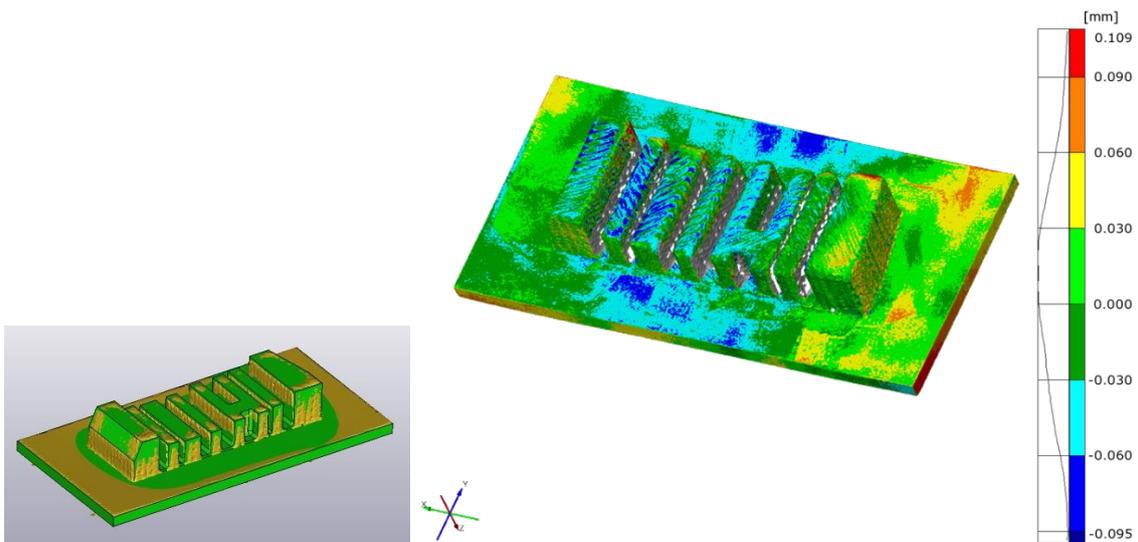


Figura 9. Escaneado 3D.

La desviación antes y después del TT, aunque es mínima demuestra que ha tenido lugar una relajación de tensiones lo cual minimiza los riesgos de rotura durante la etapa del mecanizado.

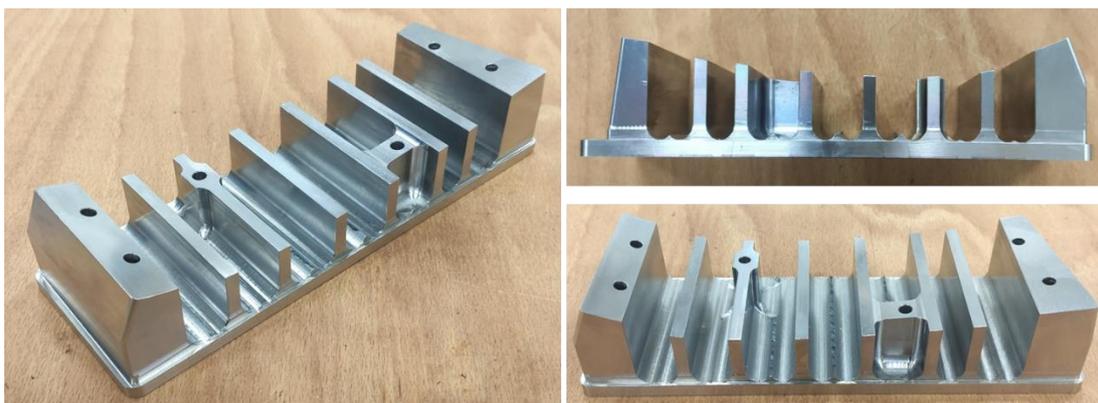


Figura 10. Pieza tras el mecanizado.

Finalmente, tras mecanizar la pieza, se ha llevado a cabo un control y testeo funcional de la pieza.

Algunos puntos están fuera de las tolerancias requeridas inicialmente debido al mecanizado final (subcontratado), pero aceptable por la empresa LAUAK siendo las tolerancias definidas muy ajustadas a propósito.

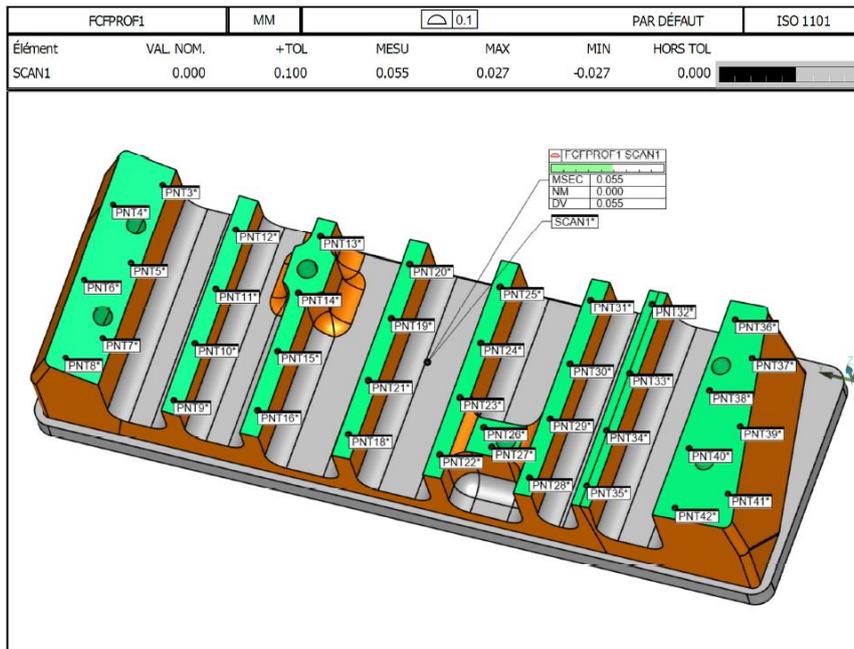


Figura 11. Ensayo de control realizado por LAUAK.

Esta pieza es funcional y está siendo usada por LAUAK.

DED HILO ARCO

El proceso de fabricación se hizo con:

- Brazo robótico Fanuc
- Equipo de soldadura CMT Fronius
- Hilo SelectArc 15CDV6 – Diámetro 1,2 mm.

Se llevó a cabo la siguiente metodología para desarrollar las estrategias de fabricación mediante DED Hilo Arco:

- Optimización de los parámetros con el material 15CDV6. Se verificó la calidad y geometría de los cordones de soldadura.



Figura 12. Cordones de soldadura.

Los parámetros seleccionados para la fabricación de las paredes se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros seleccionados para la fabricación de las paredes.

V soldadura (cm/min)	V hilo (m/min)	Corriente (A)	Voltaje (V)
40	6,2	200	15,5

Se han utilizado dos movimientos de robot diferentes para seleccionar el que obtenga el espesor requerido (>6 mm): dos cordones de soldadura solapados y circling. Se hizo un mecanizado superficial para ver cómo eliminando el menor material posible se obtenía el espesor requerido.

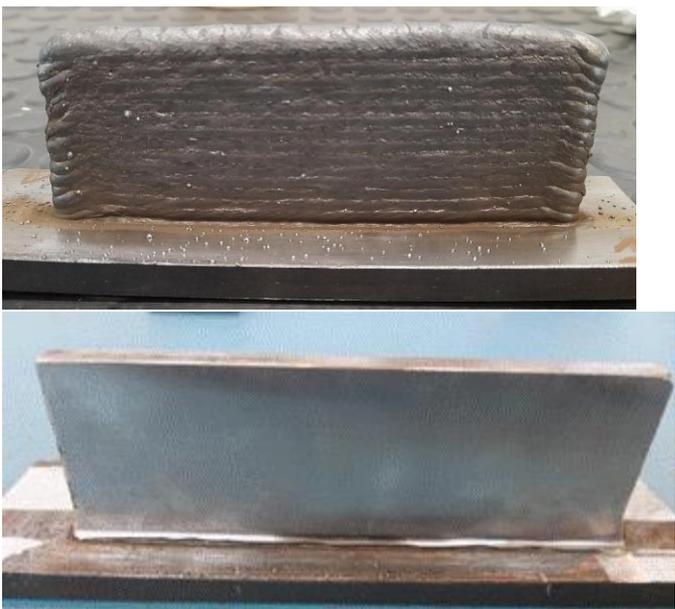


Figura 13. Paredes fabricadas antes y después de mecanizar las superficies.

- Tras la caracterización microestructural y mecánica, se seleccionó la estrategia de circling ya que obtenía una microestructura homogénea en toda la pared.

Se hizo una pared grande para analizar las propiedades mecánicas en 2 orientaciones.



Figura 14. Pared fabricada para caracterización.

- Rediseño de la pared con sobre espesor (1 mm por cada lado de la pared) considerando que ese material se eliminará mediante mecanizado.

El principal objetivo seguido era reducir al máximo el material depositado, por lo tanto, las paredes se descendieron al nivel del sustrato y se añadieron dos rigidizadores para prevenir distorsiones en los extremos de la pieza.

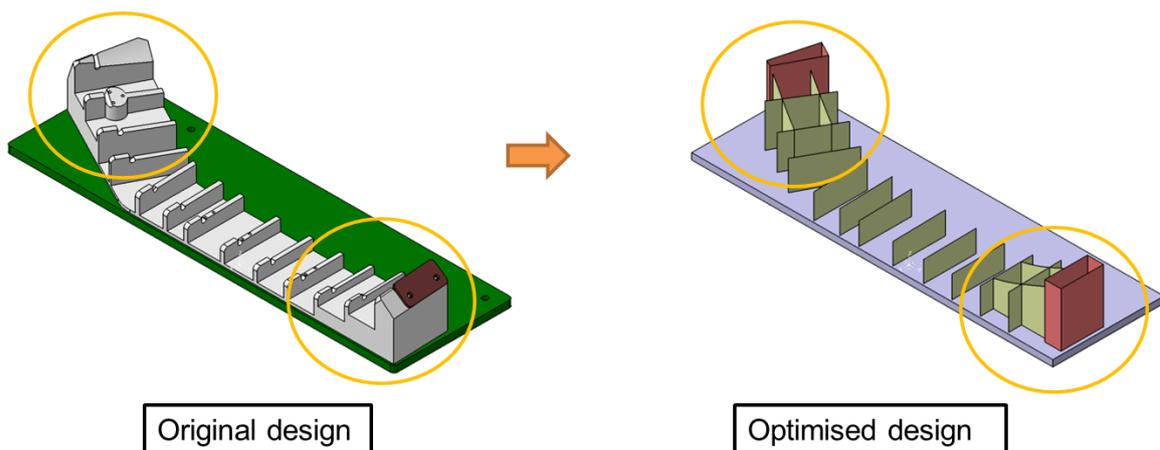


Figura 15. Diseño original y rediseño optimizado para WAAM.

Se fabricaron detalles para optimizar las intersecciones entre paredes.



Figura 16. Fabricación de detalle para la optimización de la estrategia.

- Programación de la trayectoria del robot de la secuencia de deposición del material. Se planifica para homogenizar al máximo el calor en la pieza y evitar distorsiones.

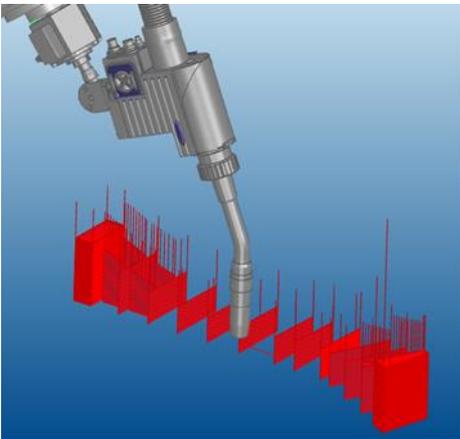


Figura 17. Simulación de la trayectoria del robot para la fabricación de la pieza.

- Simulaciones térmicas y de distorsiones para definir el tiempo de espera entre capas y la trayectoria del robot de forma que se optimice la estrategia de fabricación para reducir las distorsiones durante la etapa de fabricación.

El tiempo de espera entre capas seleccionado es variable a lo largo de la fabricación de la pieza para evitar la acumulación de calor. A medida que la pieza crece en altura, el tiempo de espera tiene que aumentar para asegurar una temperatura límite de la pieza por debajo de 150 °C.

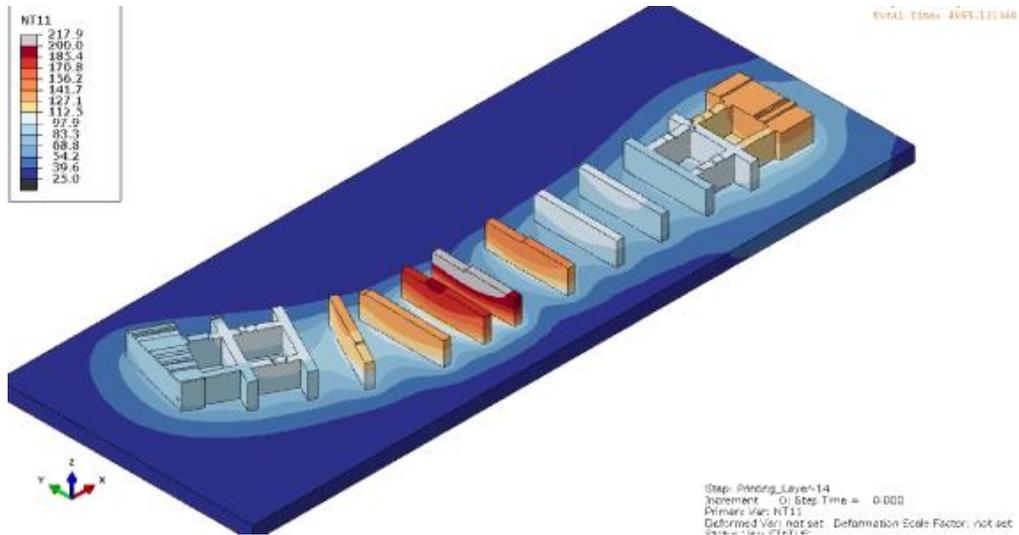


Figura 18. Simulación de la temperatura tras la deposición de cada capa.

La deformación esperada muestra cómo la pieza debería mecanizarse para cumplir los requerimientos dimensionales.

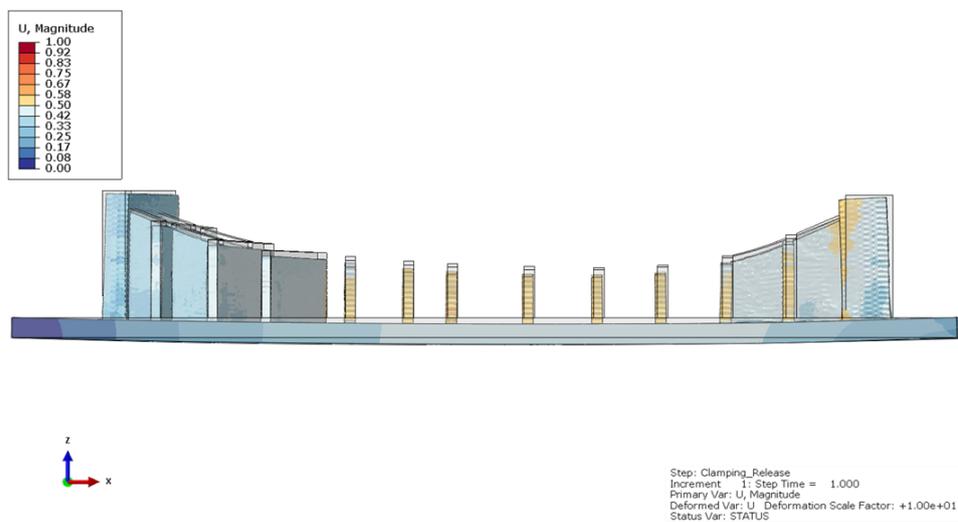


Figura 19. Simulación de distorsiones tras soltar los amarres.

- Diseño del amarre: se utilizaron amarres en forma de L con tornillos colocados en cada lateral del sustrato.

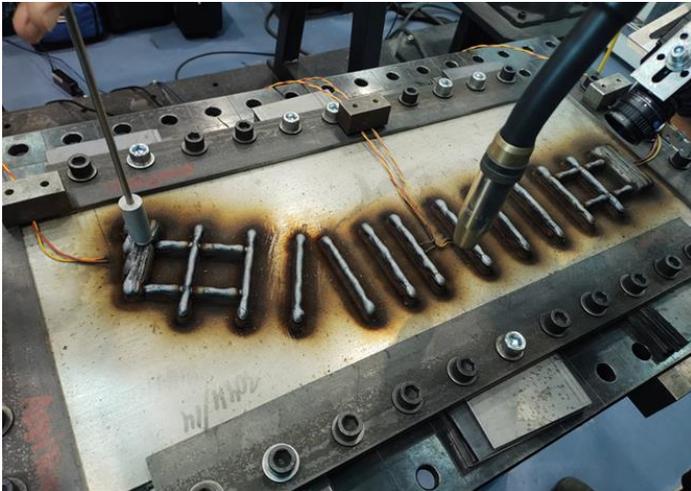


Figura 20. Fabricación del demostrador y monitorizado de la temperatura.

- La fabricación de la pieza se hizo con la tecnología CMT y un brazo robótico sobre un sustrato de 650 x 250 x 14 mm de 304.

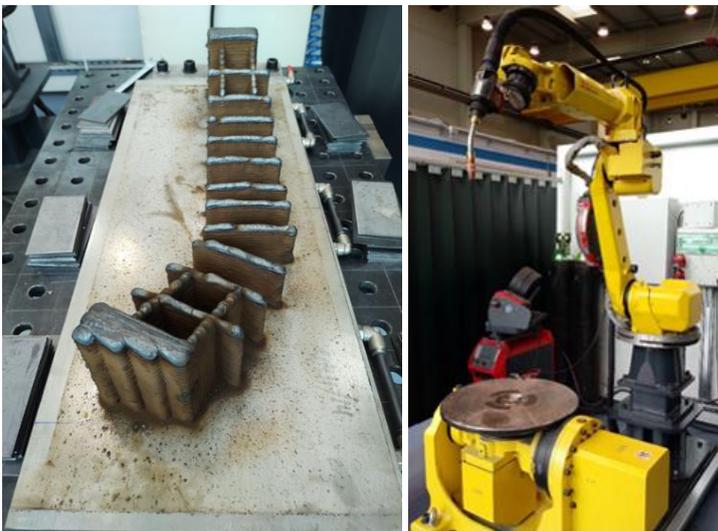


Figura 21. Pieza fabricada y robot utilizado para su fabricación.

- Monitorización de la temperatura y del baño de fusión.

Se soldaron 4 termopares tipo K al sustrato y se utilizó un termopar de contacto para monitorizar la temperatura en la parte superior de las paredes entre la deposición de

capas y comparar los valores con los resultados de las simulaciones.

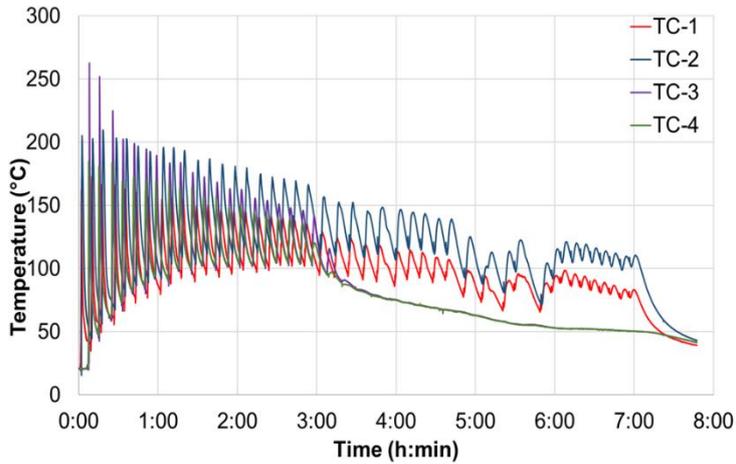


Figura 22. Valores de la temperatura del sustrato de los termopares tipo K.

- Análisis dimensional y best fit tras la fabricación.

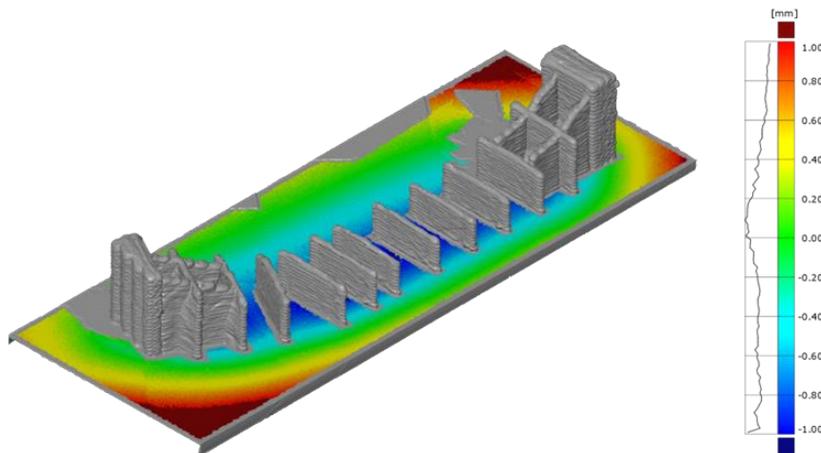


Figura 23. Best fit de la distorsión sufrida por el sustrato.

- Mecanizado de la pieza. Durante el mecanizado parecieron nuevas distorsiones debidas a las tensiones residuales.



Figura 24. Mecanizado de las zonas críticas del demostrador.

- Análisis dimensional tras el mecanizado y el best fit de las superficies críticas.

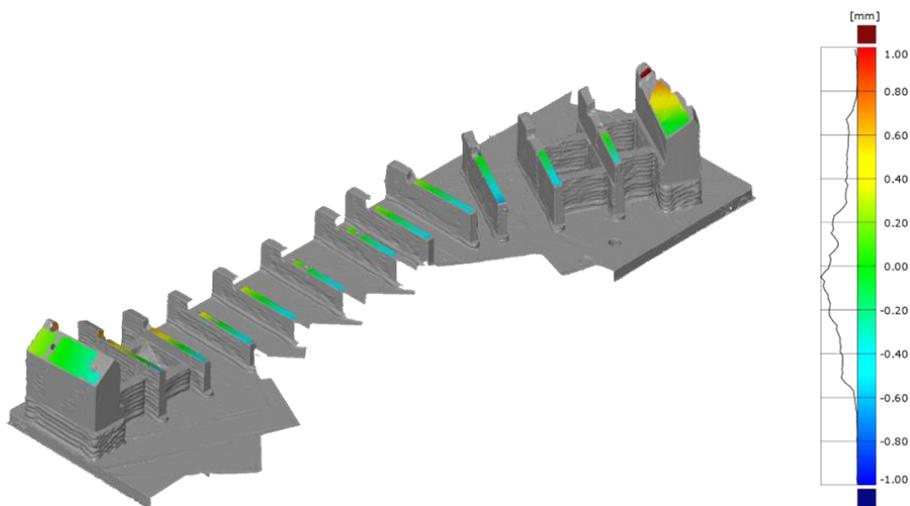


Figura 25. Best fit de las zonas críticas mecanizadas.

Algunos puntos han quedado fuera de las tolerancias establecidas, pero se espera que estén admitidas por la empresa LAUAK, debido a que las tolerancias definidas inicialmente eran demasiado estrechas.

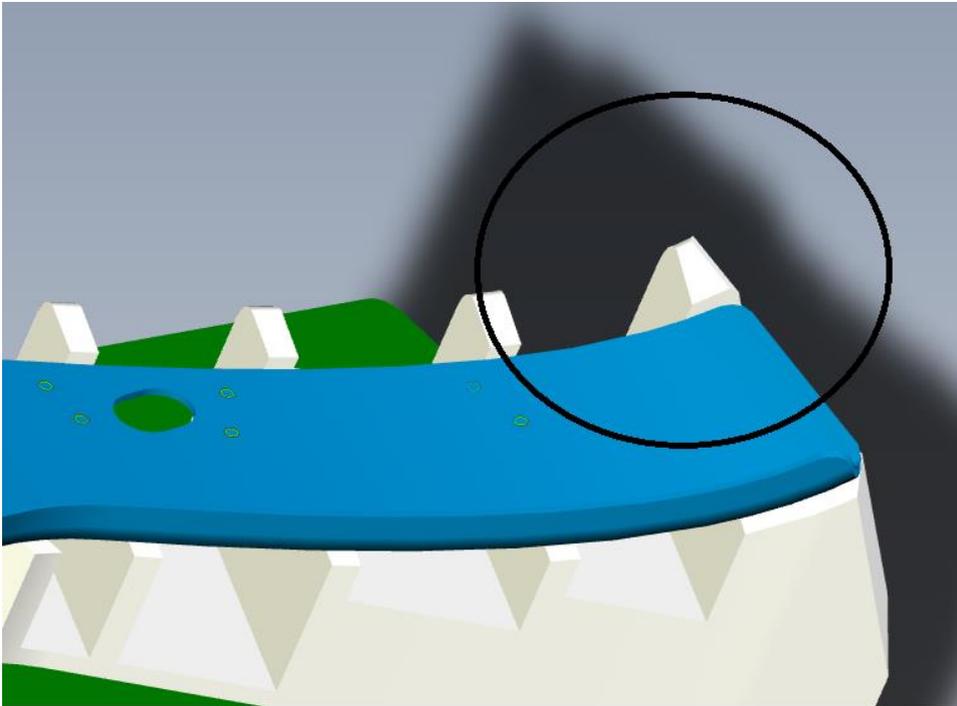


Figura 26. Zona fuera de tolerancias.

DED POLVO LASER

Se caracterizó el polvo atomizado en CEIT, asegurando una morfología adecuada, baja porosidad, pocas partículas con satélites, con un tamaño de partícula entre 44-106 μm y un diámetro medio de 73 μm .

Se aplicó la siguiente metodología:

- **Optimización de los parámetros con el material 15CDV6. Ensayos de cordón unitario y cordones solapados.**

Mediante ensayos en cordones unitarios se establecieron los valores óptimos de la potencia del láser (P), velocidad de avance (F), y velocidad de alimentación del polvo (Q). para el Diseño de Experimentos (Tabla 3), se ha usado la metodología de nivel 3 factor 3, empleando como valores centrales los parámetros de deposición del H13:

Tabla 3. DoE de los ensayos de deposición de cordones unitarios para 15CDV6 mediante L-DED.

	P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)
Ref.	600	450	3.3
Max	700	550	4
Min	500	350	2.6

De los 27 cordones unitarios, se elige el cordón óptimo en base a:

- Integridad metalúrgica
- Adecuación geométrica (valor Altura/Anchura cercano a 0,25)
- Valor de dilución cercado a 30 %

Basándonos en los criterios previos, los valores óptimos de los parámetros de deposición son: P = 600 W, F = 550 mm/min y Q = 3,3 g/min. El cordón de soldadura fabricado con estos parámetros se muestra en la Figura 27. La altura del cordón es de 0,229 mm, el espesor 1,234 mm y la profundidad de dilución 0,184 mm.

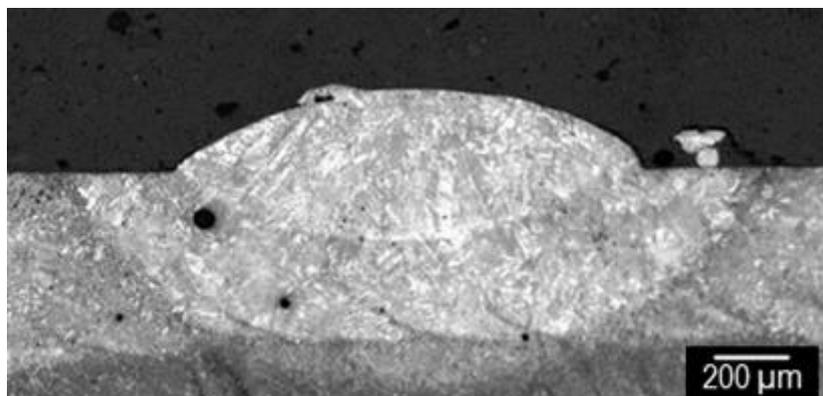


Figura 27. Sección del cordón unitario fabricado con los parámetros óptimos.

Se han fabricado 4 capas empleando los parámetros de arriba y en cada una se ha aplicado un solape de 30 %, 35 %, 40 % and 45 % entre cordones. El valor de solape óptimo debe conseguir una altura de capa homogénea manteniendo una dilución en el sustrato suficiente, la cual para el material 15CDV6 es de un 40 %. La Figura 28 muestra la sección de un solape de capa óptimo.

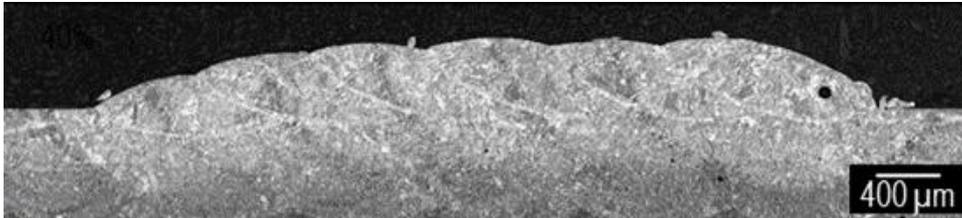


Figura 28. Capa óptima fabricada con un solape del 40 %.

➤ **Pruebas de la estrategia de deposición mediante la fabricación de paredes.**

Para probar la mejor estrategia de deposición, se han fabricado 3 paredes de 6x30x15 mm con las estrategias mostradas en la Figura 29. La primera capa se fabrica sin paradas de enfriamiento. A partir de la segunda capa, se introduce una pausa cada 8 capas aportadas para permitir el enfriamiento y evitar la acumulación de calor.

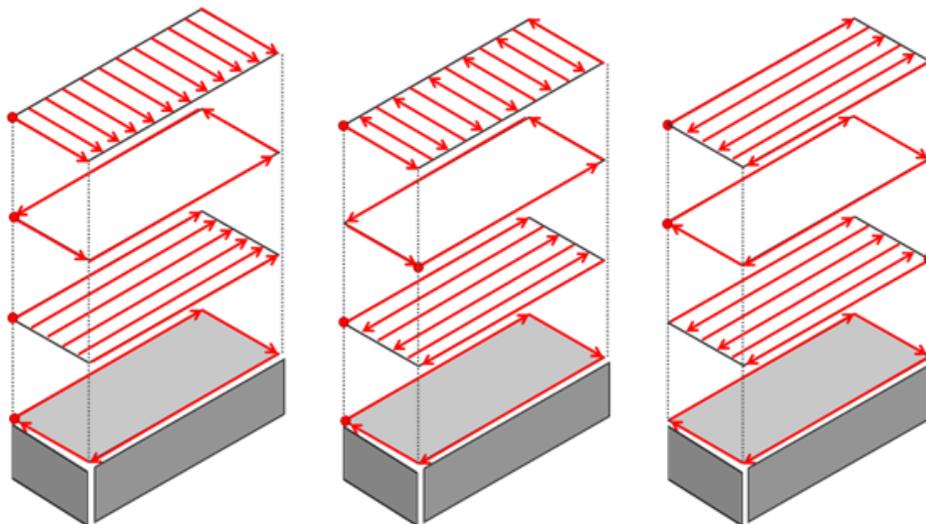


Figura 29. Estrategias de deposición probadas para la fabricación de paredes.

La segunda pared, donde el material de relleno se ha depositado en zig zag en las direcciones longitudinal y transversal, muestra la altura más uniforme y la mejor precisión geométrica teniendo en cuenta la uniformidad del campo térmico creado durante la fabricación. Las 3 secciones se muestran en la Figura 30.

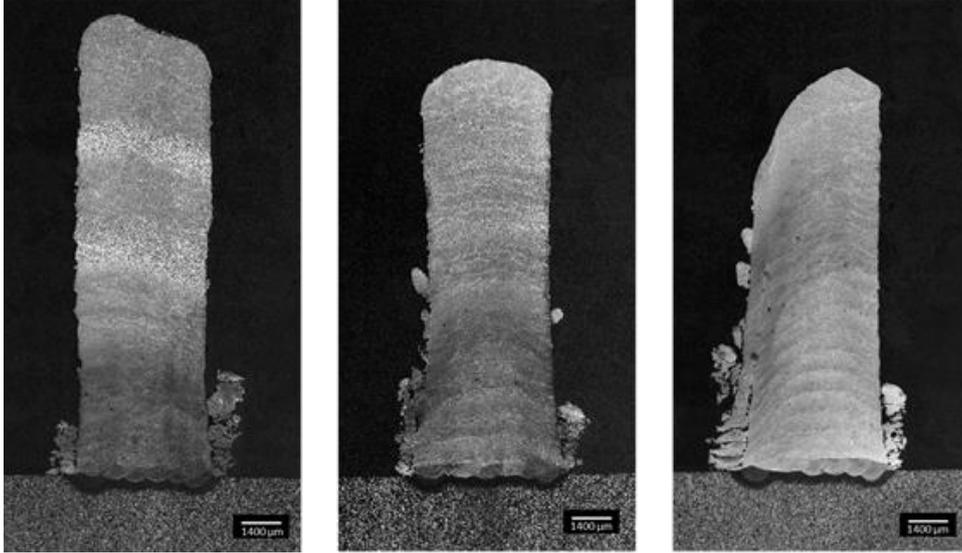


Figura 30. Secciones de las paredes fabricadas.

➤ **Caracterización de la microestructura y la microdureza.**

El análisis microestructural del material depositado revela la creación de ferrita acicular durante el proceso. La formación de esta microestructura se promueve por el rápido ciclado térmico de la tecnología L-DED y de los elementos aleantes presentes en el material 15CDV6.

La relación entre los tiempos de enfriamiento y la presencia de ferrita acicular se observa en la Figura 31, donde se muestra que el material depositado cuando el sustrato está sobrecalentado muestra un grano más grueso con un mayor contenido en ferrita. Tras las paradas de enfriamiento, el material disipa calor de manera eficiente nuevamente consiguiendo de nuevo la microestructura previa.

La formación de ferrita acicular se relaciona con una mejora de las propiedades mecánicas del material depositado, con un valor medio de microdureza de 40 HRC.

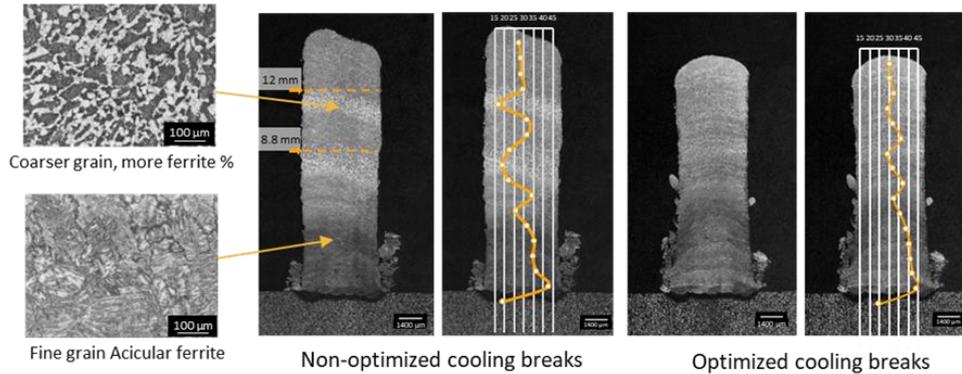


Figura 31. Microestructura, tiempos de enfriamiento y valores de microdureza de las paredes fabricadas con y sin paradas de enfriamiento.

➤ Fabricación del demostrador.

El demostrador se ha fabricado a partir de una preforma mecanizada de material AISI1045. El proceso se ha llevado a cabo utilizando como referencia los parámetros previos desarrollados dando lugar a un depósito de 0,4 mm de altura con la estrategia de solape del 40 %. Las superficies de contacto se han mecanizado 2 mm adicionales para prepararlas para la deposición del 15CDV6 y el mecanizado final.

Durante el proceso de fabricación la pieza se inclina para permitir el acceso del cabezal a la superficie de deposición como se muestra en la Figura 32.

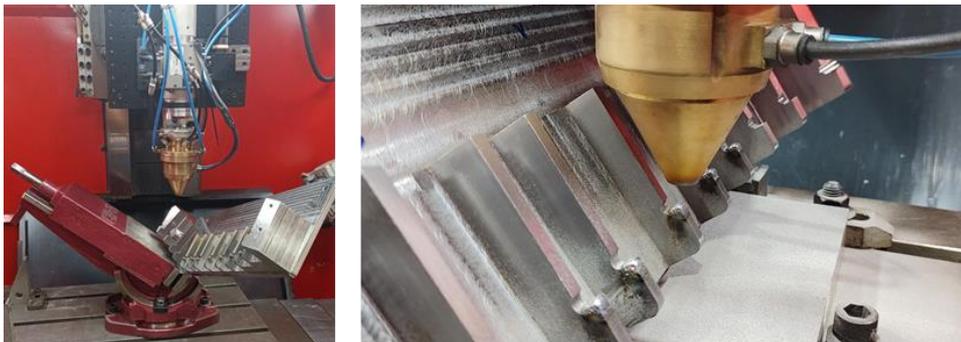


Figura 32. Set up para la fabricación del demostrador con L-DED.

La Figura 33 muestra el demostrador antes del post procesado.

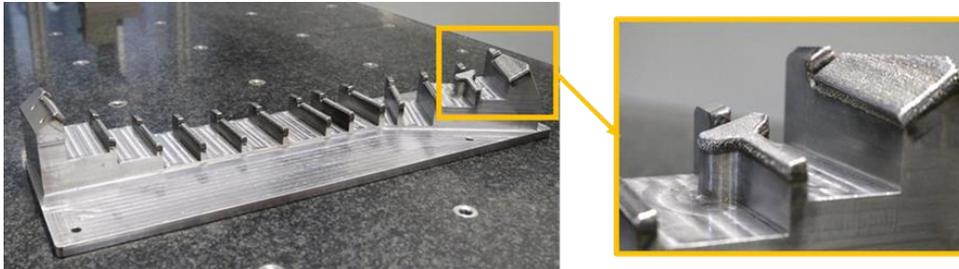


Figura 33. Demostrador tras el depósito de 15CVD6 con L-DED.

La zona con el material depositado se ha mecanizado parcialmente para mostrar las diferentes etapas del proceso de fabricación. Las superficies post procesadas tienen una precisión dimensional de 0,1 mm y una Ra entre 1,5 y 2. La dureza medida en las caras post procesadas es de 42 HRC.

Las lecciones aprendidas en el Desarrollo de este piloto demostrativo son:

Se han fabricado piezas sanas y sin defectos empleando tecnologías de FAM aplicando las siguientes estrategias:

- **Hibridación** de mecanizado y FAM. Esto tiene la ventaja de reducir la dificultad del mecanizado en zonas específicas y dar la posibilidad de usar materiales de alto valor añadido en las zonas requeridas y un material más barato en el resto.
- **Rediseño** para FAM. Esto tiene la ventaja de reducir la masa de la pieza alrededor de un 30 %.

El rediseño es esencial para obtener las ventajas de la FAM:

- Ahorro de material
- Reducción de desperdicio de material
- Tiempo de entrega reducido

La simulación mejora las estrategias de deposición para reducir distorsiones. En este aspecto, se llevaron a cabo simulaciones de temperatura y tensiones residuales para asegurar una fabricación adecuada sin distorsiones ni colapso. Sin embargo, también es muy importante conocer la distorsión final de la pieza para optimizar el sobreespesor y cumplir con los requerimientos dimensionales tras el mecanizado posterior.

Piloto PT1-MOLDETIPO

Fabricación

El inserto de molde del Piloto PT1 se ha fabricado mediante L-PBF en un equipo Trumpf TruPrint 1000. La pieza se fabricó utilizando polvo W360 de Böhler, un acero de herramienta cuyas propiedades son equivalente a las del acero H13.

Antes de la fabricación de la pieza, se fabricaron muestras del mismo material para llevar a cabo una caracterización mecánica, microestructura y térmica. Los resultados de esta tarea se pueden consultar en el entregable D 2.1.1 Informe del material para FAM.

Los parámetros de proceso empleados se muestran en la Tabla 4. La pieza obtenida se muestra en la Figura 34.

Tabla 4. Parámetros de proceso de L-PBF utilizados para la fabricación del inserto.

Area / Zonas	Parámetros: velocidad de soldadura y potencia del láser
Núcleo (interior de la pieza)	700mm/s 120W
Downskin (zonas sin soporte)	460mm/s 30W
Inskin Hatch (solape entre la capa externa e interna de la pieza)	700mm/ 120W
Inskin Border (capa externa)	500mm/s 80W

Post-procesado

El post procesado de la pieza conlleva separar la pieza de la Plataforma mediante corte por hilo. Esto se realizó en la empresa local (EROFIO) la cual posee el equipamiento necesario para esta tarea. No se le aplicó ningún tratamiento térmico.

Tras esto, la pieza se envió a Moldetipo, donde se preparó la pieza para su ensamblaje en el molde mediante mecanizado, corte por EDM y operaciones de ajuste detalladas. Estas operaciones son como las que se le aplican al inserto fabricado de forma convencional. Figura 34 muestra el estado final del inserto.



Figura 34. Geometría final del inserto fabricado por L-PBF tras el acabado.

Tras la fabricación del inserto, éste se analizó mediante XCT (tomografía computerizada), para verificar la geometría interna de los canales y comprobar que no hay defectos. La imagen obtenida por XCT se puede ver en la Figura 35. Se ve cómo los canales están fabricados correctamente, únicamente se observa una rugosidad mínima de la superficie del interior de los canales.

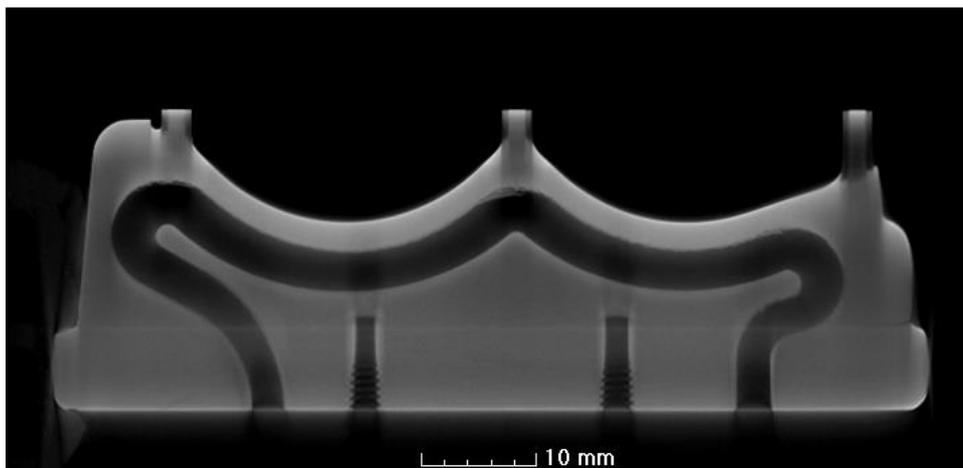


Figura 35. XCT del inserto fabricado por L-PBF donde se muestran los canales internos de la refrigeración.

Sin embargo, un análisis más detallado del área que conecta la base con la superficie active del inserto muestra grietas (Figura 36). Algunas de estas grietas se ven a simple vista.

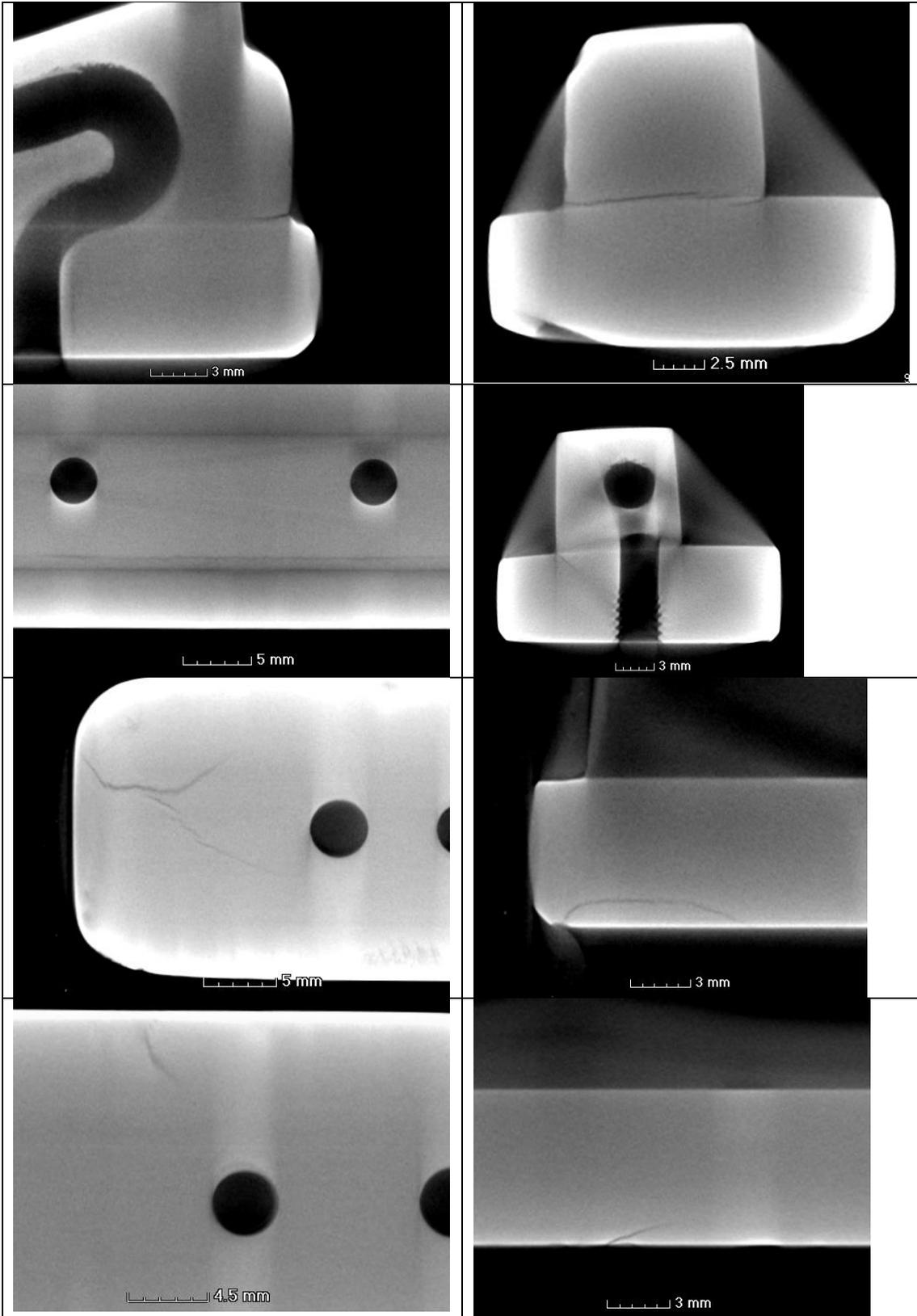


Figura 36. Grietas observadas tras el análisis detallado de la pieza mediante XCT.

Caracterización del demostrador

En general la fabricación del demostrador ha sido satisfactoria. Moldetipo considera que el inserto del molde puede generar conducir a ganancias en la productividad de la pieza. Otras piezas se pueden beneficiar de la estrategia seguida. La geometría de enfriamiento ha demostrado un efecto significativo en el ciclo del moldeo y es económicamente viable – ver resultados en el entregable E.3.2.1. – estudio de viabilidad.

Las lecciones aprendidas del desarrollo de este piloto demostrativo son:

La fabricación de este piloto ha mostrado que es posible el empleo de las tecnologías de FAM para obtener una pieza funcional, para una aplicación industrial con una función mejorada la funcionalidad se ha demostrado a pesar del que se han detectado algunos defectos. Se propone la aplicación de tratamientos térmicos a este tipo de pieza para controlar la estructura del material y obtener una mayor tenacidad.

Piloto SP1-MEUPE/INESPASA

El rediseño del caso de uso del piloto SP1 (Figura 37) se ha llevado a cabo considerando:

- Canales internos con enfriamiento de aire forzado para reducir la temperatura de la superficie de la carcasa.
- Agujeros para refrigerar el motor con aire en funcionamiento.

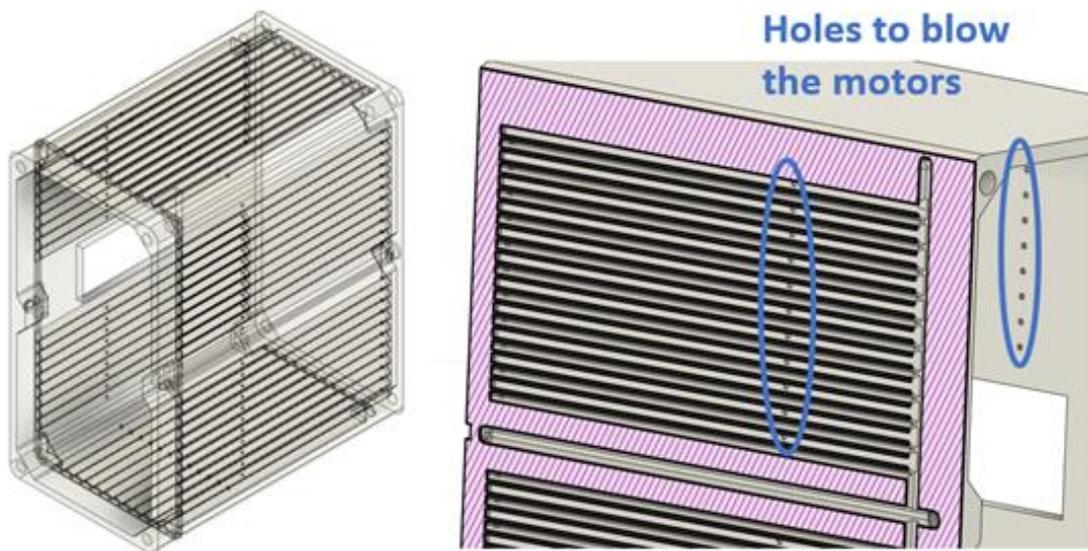


Figura 37. Diseños de los canales internos y agujeros de refrigeración para el motor.

Antes de la fabricación de la carcasa, se han tenido en cuenta algunas consideraciones:

- Los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales presentados en el entregable E.2.1.1 Informe de los materiales para FAM.
- Los resultados térmicos a nivel cupón descritos en el mismo entregable E.2.1.1 Informe de los materiales para FAM.
- La simulación térmica de la carcasa.

Con respecto a este último, algunas simulaciones térmicas se han realizado para evaluar el comportamiento de toda la máquina de taladrado. Por el contrario, en el análisis realizado a nivel de cupón, en este caso las condiciones del modelo se mantienen constantes y el ensayo experimental se realiza únicamente para determinar el error del modelo. La Figura 38 muestra la sección de la carcasa fabricada por FA. Como se puede ver, tras 50 minutos trabajando, la temperatura del motor alcanza casi los 70 °C, pero gracias al diseño de la carcasa externa y al sistema de convección forzada implementado la temperatura externa se mantiene por debajo de los 25 °C.

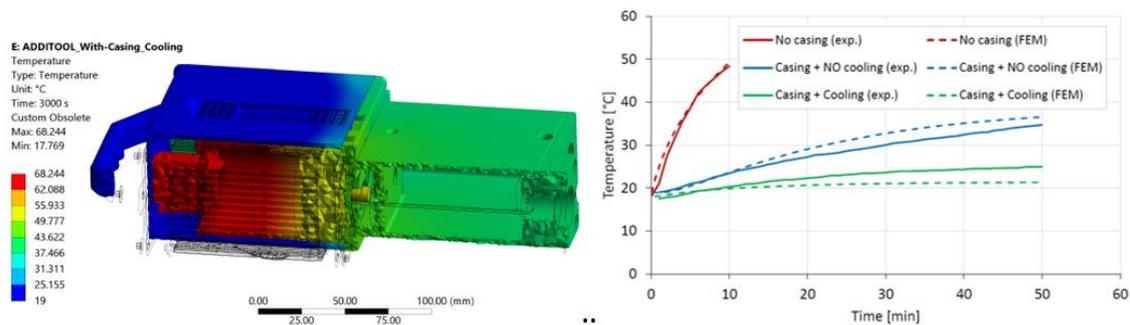


Figura 38. Sección del campo térmico de la máquina de taladrado con la carcasa de FA y el enfriamiento activado (izquierda). Comparación entre los resultados experimentales y las temperaturas simuladas (derecha).

Este piloto se ha fabricado mediante Fusión de lecho de polvo con láser (L-PBF) en una plataforma Renishaw (RenAM 500E). se han fabricado 2 trabajos diferentes (BJ1 y BJ2) en Scalmalloy® con un espesor de capa de 30 µm. las carcasas se han diseñado y orientado en el plato de fabricación para evitar la estructura de soportes de forma que se minimice el tiempo de fabricación y post-procesado. En la Figura 39 izquierda, se puede ver el proceso de fabricación y en la Figura 39 derecha, el proceso de extracción del BJ2.

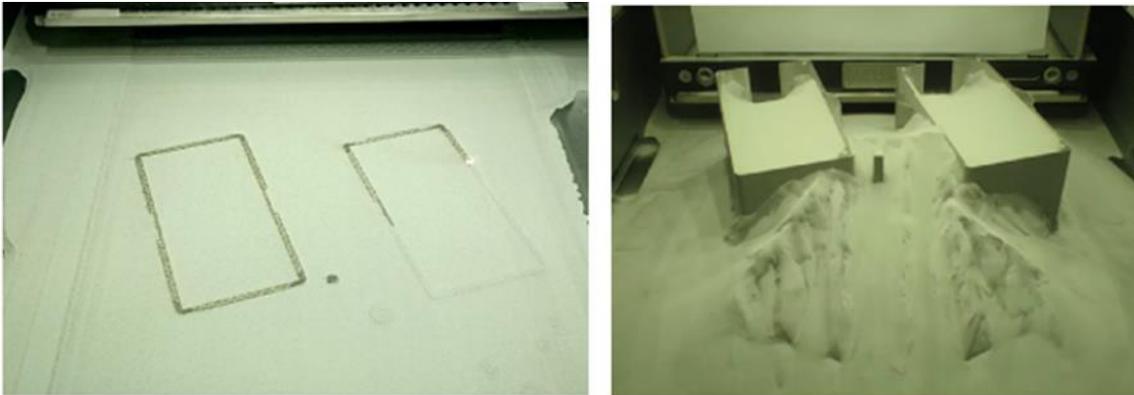


Figura 39. (Izquierda) Proceso de fabricación y (derecha) proceso de extracción del BJ2.

Se han fabricado 3 carcasas en 2 lotes diferentes. La fabricación del BJ1 (Figura 40 izquierda) ha durado 30 horas con un consumo de material de 246 g para fabricar el demostrador 1 (D1), mientras que el BJ2 (Figura 40 derecha) ha tardado 42 horas con un consumo de material de 432 g para fabricar los demostradores 2 y 3 (D2 y D3). La extracción del polvo ocluido en los canales internos del D1 y D3 se ha realizado a través de los agujeros diseñados para refrigerar el motor.

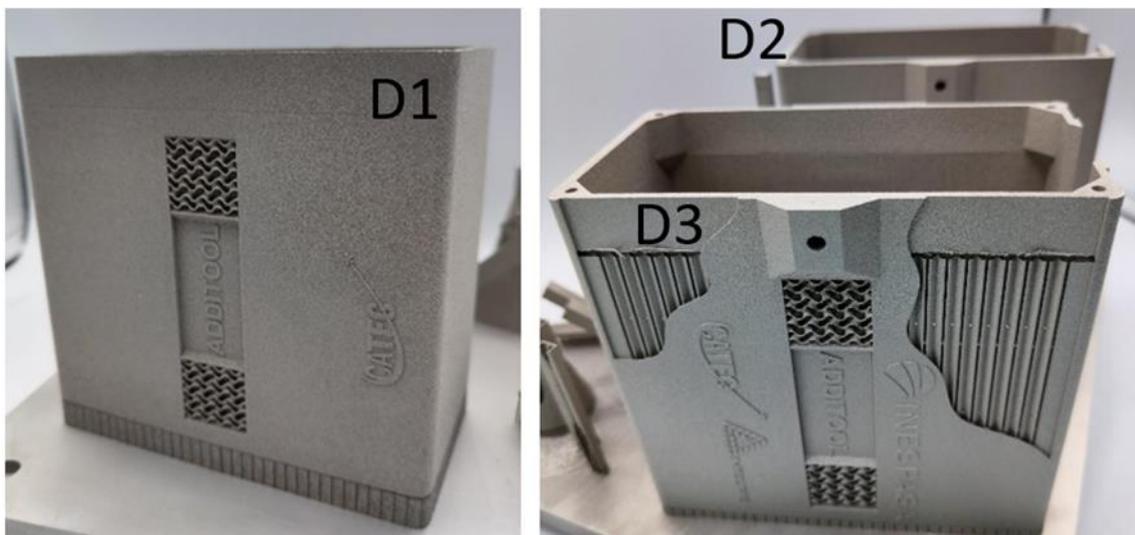


Figura 40. Demostradores (izquierda) D1, (derecha) D2 y D3 unidas todavía al plato de fabricación.

El D3 se ha fabricado como un demostrador para mostrar los canales internos mientras que los D1 y D2 se han producido para demostrar la solución con aire forzado en uso.

Para comparar diferentes procesos para obtener las intercaras (áreas con mayores requerimientos dimensionales, marcados en rojo en la Figura 41), se han considerado 3 post procesos diferentes:

- Las intercaras del D1 se ha realizado por mecanizado (instalaciones de MEUPE, Figura 42, izquierda).
- Las intercaras de D2 y D3 se han conseguido mediante EDM-Electro Discharge Machining (Figura 42, derecha), y las roscas mediante taladrado vertical (Figura 43).

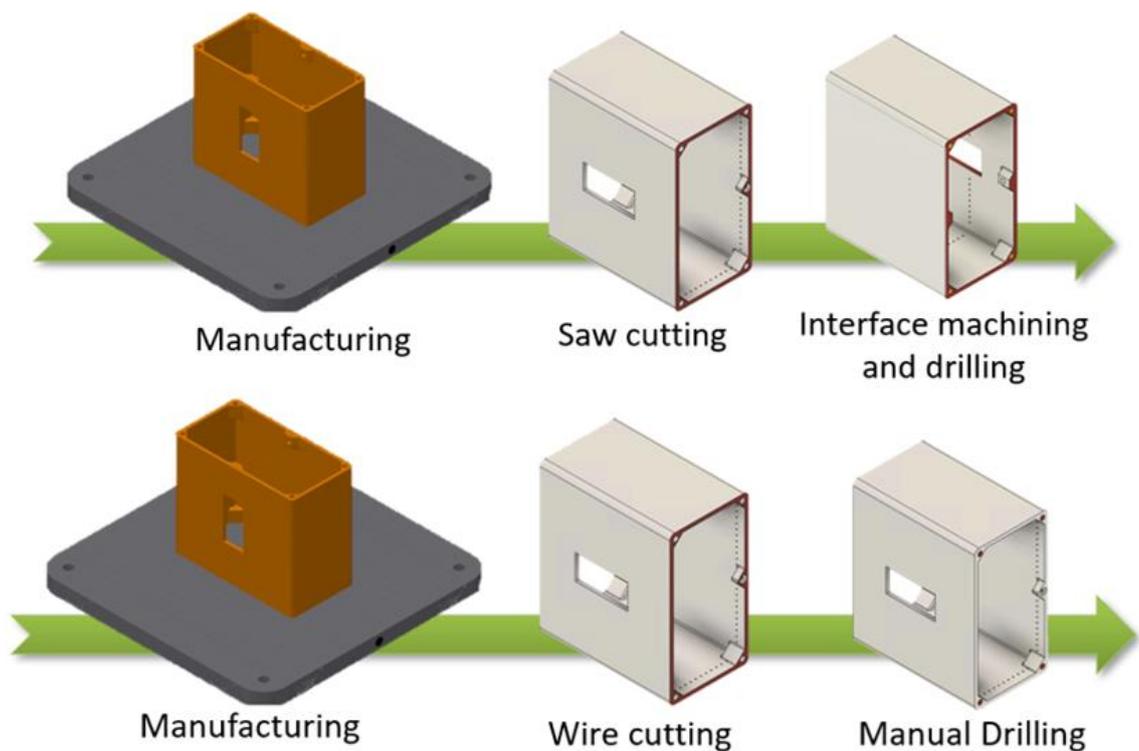


Figura 41. Ruta de post procesado de D1 (arriba) y D2 y D3 (abajo).

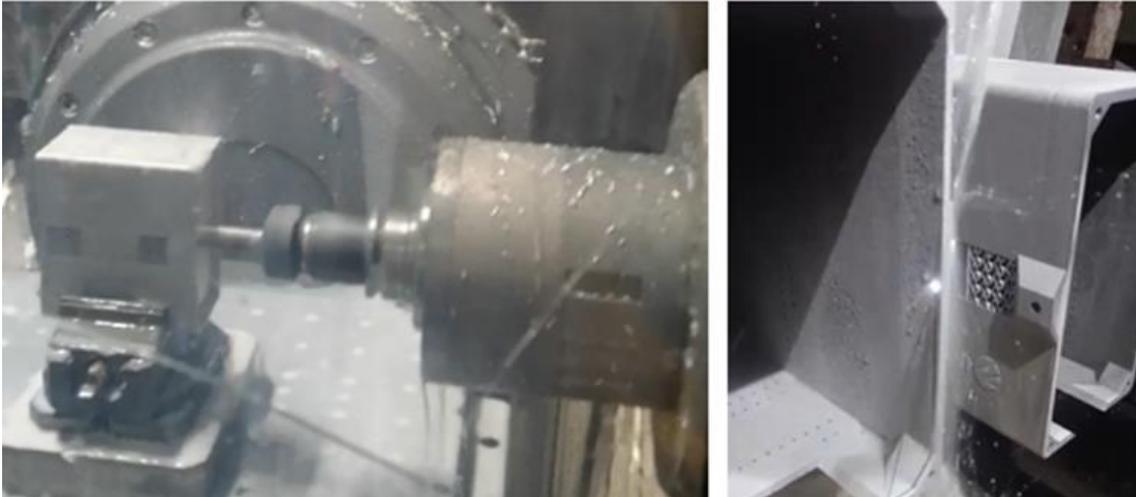


Figura 42. (izquierda) proceso de mecanizado de las intercargas del D1 y (derecha) intercarga obtenida mediante EDM en D2 y D3.

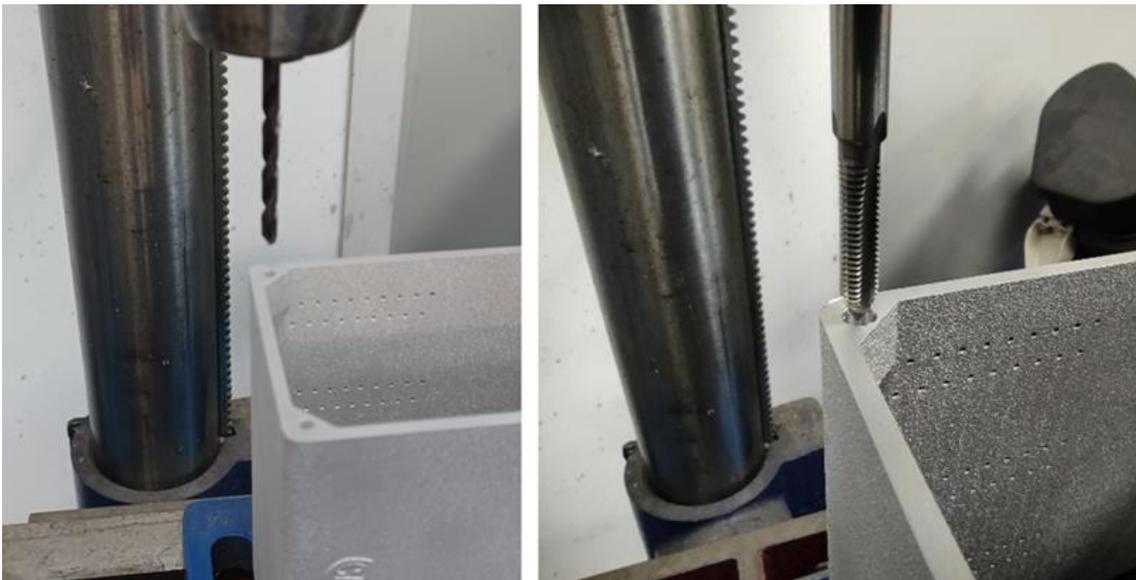


Figura 43. (izquierda) taladros y (derecha) roscas obtenidas manualmente en D2 y D3.

Para asegurar que no queda polvo ocluido en los canales internos, se ha introducido un fluido químico a través de las cavidades. Se ha usado un ácido fluorhídrico durante 5 minutos como máximo para evitar la reducción del espesor y mantener la integridad estructural. En la Figura 44 se puede ver el demostrador tras el proceso de limpieza.

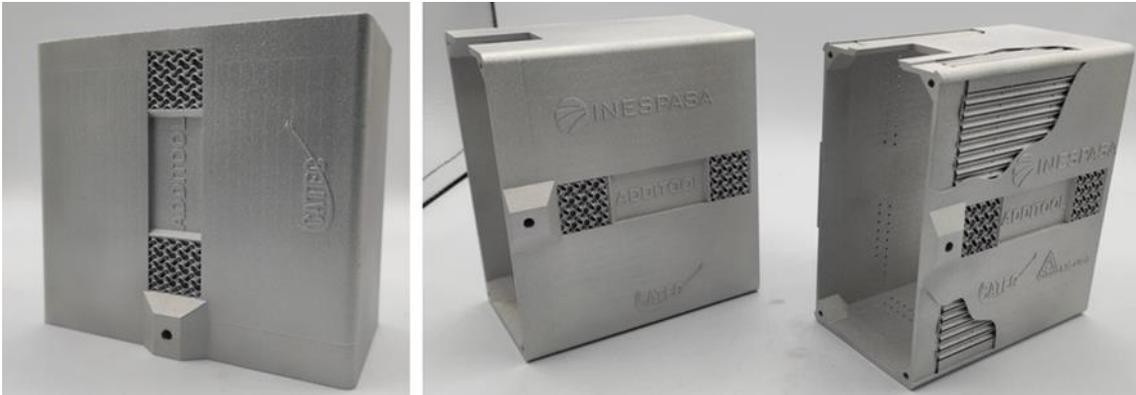


Figura 44. D1 (izquierda) y D2 y D3 (derecha) tras el proceso de limpieza.

Todos ellos fueron inspeccionados por tomografía computarizada, siendo la única técnica no destructiva capaz de mostrar las desviaciones internas en las cavidades internas y asegurar que no queda polvo ocluido en el interior de los componentes. La Figura 45 muestra la sección en 2D y la representación en 3D de los resultados obtenidos en la tomografía hecha al D1. Para obtener el análisis de la desviación en 3D, se ha realizado un análisis comparativo entre el CAD nominal (naranja en la Figura 45) y la nube de puntos del 3D CT (gris en la Figura 45). Se ha observado que no ha quedado polvo ocluido en interior de los canales, y no se observan desviaciones significativas.

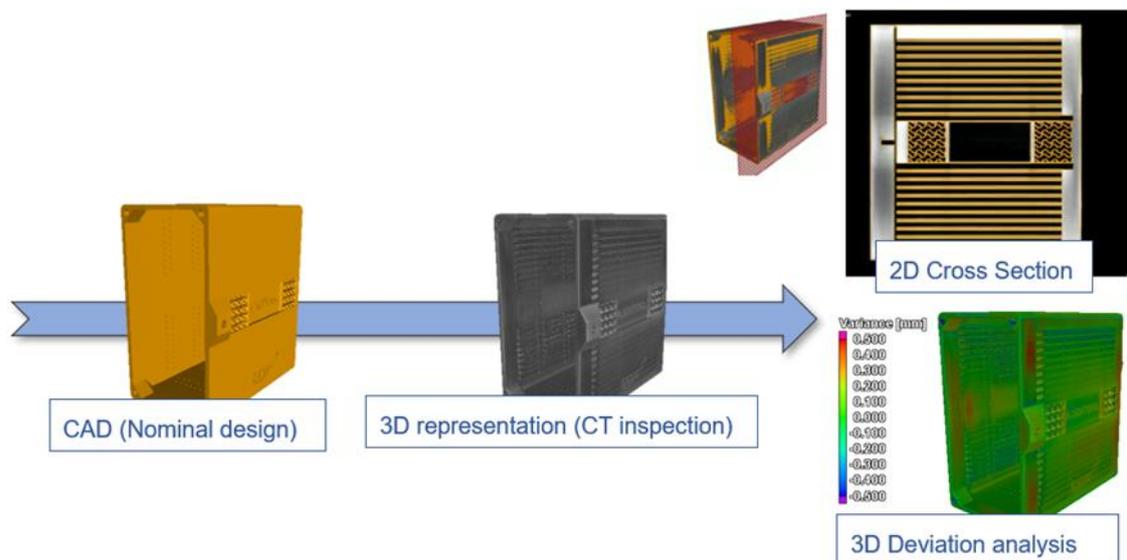


Figura 45. Resultados de la inspección CT del D1.

Se han hecho varios ensayos experimentales para validar la solución de FA. Se han usado una cámara termográfica y un termopar para monitorizar el comportamiento térmico

en uso. Ambos casos, el diseño convencional y el rediseño con canales internos, se han analizado en uso durante 50 minutos con los motores a 300 rpm. En la Figura 46 arriba a la izquierda (B) muestra la carcasa convencional alcanzando 55 °C en 50 minutos mientras que la máxima temperatura alcanzada en la carcasa de FA con enfriamiento forzado tras 50 minutos de trabajo es 25°C (A, Figura 46-abajo a la izquierda).

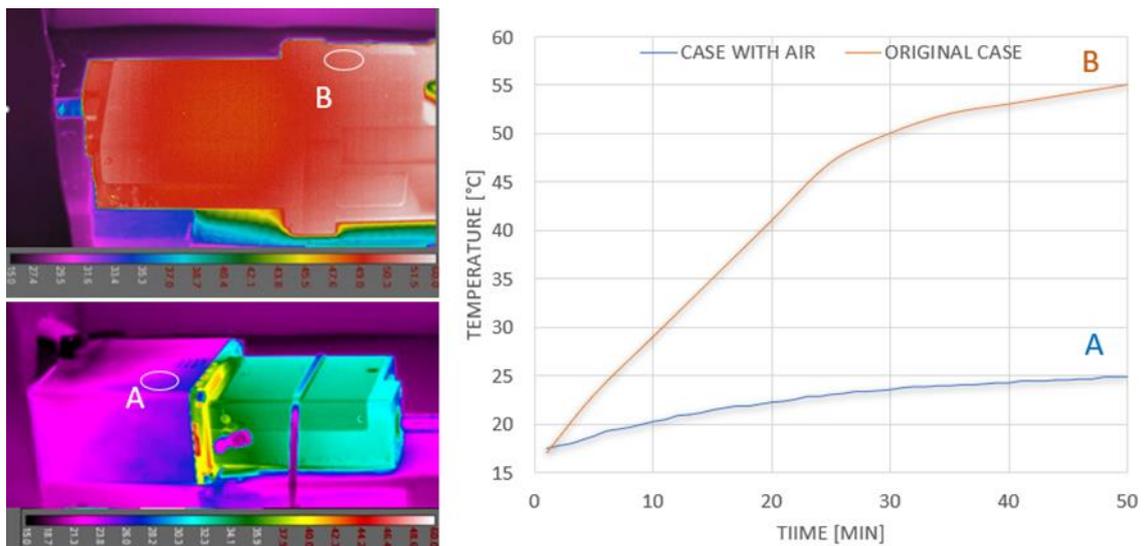


Figura 46. Imágenes termográficas de las carcasas: convencional (arriba a la izquierda) y rediseñada para FA (abajo a la izquierda). Gráfico de las temperaturas medidas con termopar (derecha).

Se han hecho ensayos adicionales para analizar el comportamiento de la carcasa de FA durante uso sin enfriamiento de aire forzado. En este caso, alcanza los 40 °C tras 50 minutos de trabajo (C, Figura 47) en lugar de los 55°C registrados en la carcasa convencional. En este punto, si se aplica aire en el interior de los canales, la carcasa alcanza los 25 °C en menos de 10 minutos (D, Figura 47).

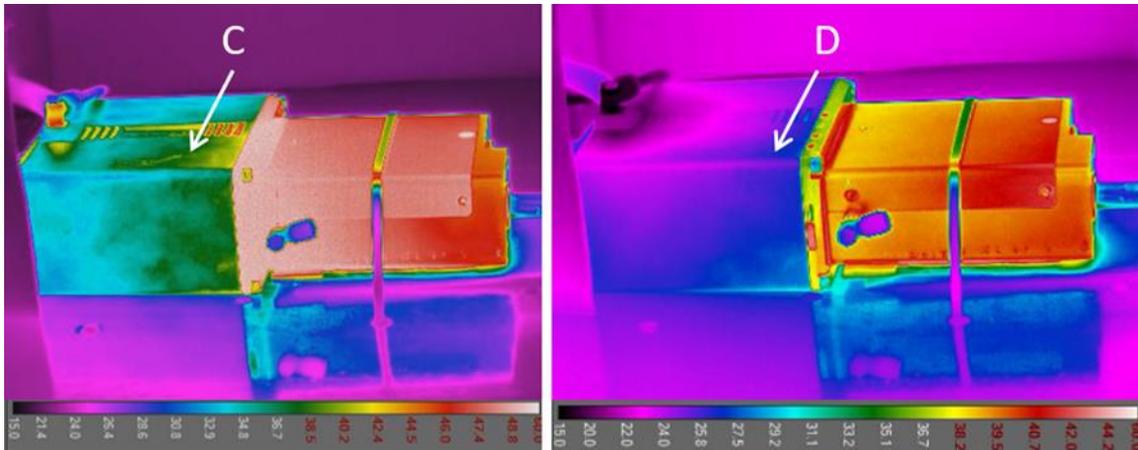


Figura 47. Imágenes termográficas de la carcasa de AM (izquierda) operando sin aire forzado y (derecha) durante el proceso de enfriamiento con aire.

Si comparamos las simulaciones térmicas con los ensayos hechos a las carcasas convencional y por FA, se puede ver en la Figura 48 una buena correlación entre el modelo y los datos experimentales.

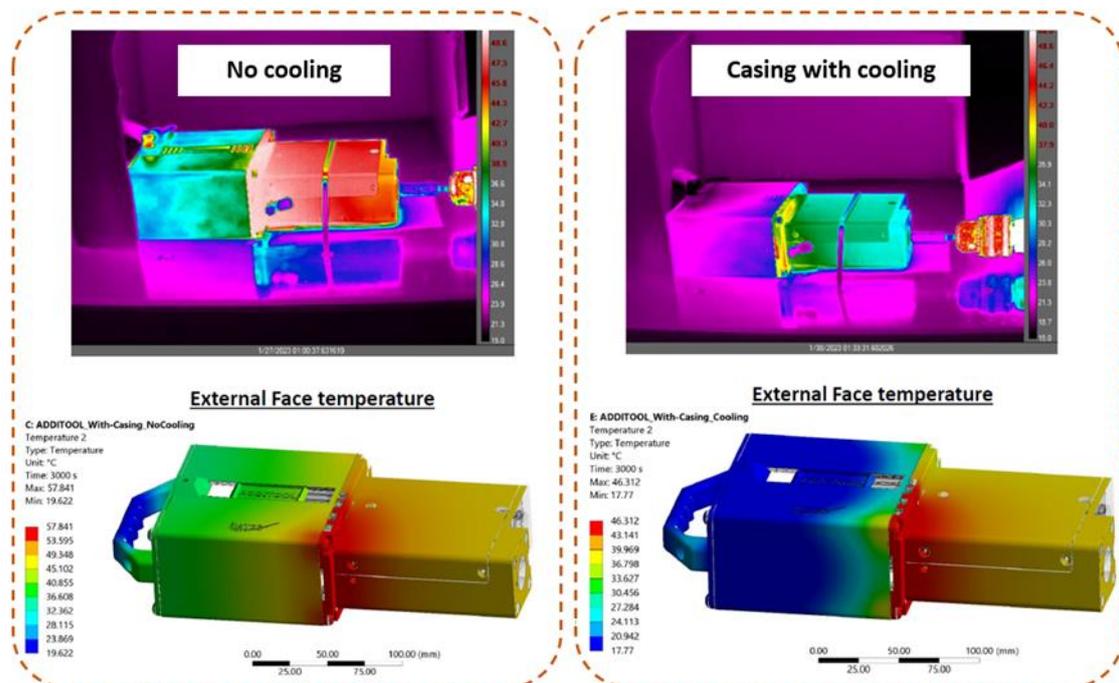


Figura 48. Comparación entre el comportamiento experimental y simulado.

En cuanto a las lecciones aprendidas durante el desarrollo de este piloto, los ensayos finales han mostrado la mejora del comportamiento térmico en términos de disipación de calor mediante la introducción de canales internos. En cuanto al calentamiento

durante uso, la diferencia ha sido de 15 °C comparando la carcasa convencional con el nuevo diseño para FA y de 30°C si se activa el enfriamiento con aire. Si la carcasa de FA se usa con enfriamiento forzado, en menos de 10 minutos puede volver a estar operativa (tras 50 minutos en uso).

En cuanto al peso del componente, usando la carcasa de FA con los canales internos, se ha conseguido una reducción en peso del 37 %.

Además, las simulaciones térmicas han demostrado una buena correlación entre los resultados térmicos experimentales y en la carcasa de FA. Esta aproximación puede ser muy interesante en el caso de que se proponga un nuevo diseño, por ejemplo, rediseñando la carcasa entera, no solo donde se aloja el motor. En este contexto, el comportamiento térmico de la carcasa se puede comprobar antes de fabricarla, evitando ensayos adicionales experimentales para validar el componente

Piloto FR2-SOMOCAP

Al utilizar un sistema abierto, es necesario realizar algunas adaptaciones desde el inicio:

- Desarrollo con la máquina de Lynxter S600D + filamento de NANO E H13 (el desarrollo con el filamento de NANO VIA 316L se cerró ya que no conseguía unas propiedades mecánicas suficientes).
- Se han hecho numerosos ensayos de impresión + eliminado del ligante + sinterizado en un horno cubico (atmósfera de argón +2.5% hidrógeno).
- Fabricación de muestras para mejorar el eliminado del ligante y sinterizado en CEIT.
- Rediseño de la pieza teniendo en cuenta todas las reglas de diseño (comunicación continua con SOMOCAP para la modificación del diámetro de los canales internos y de la correlación con la simulación).
- Negociación con otras empresas para desarrollar una nueva pasta de H13 o 17-4PH (ver Entregable 2.3.1 Estudio de viabilidad).

1) Modificación de S600D + NANO E H13

La máquina originalmente montada con "Bowden", necesitó modificaciones del hardware para transformarla en "Direct Drive". De hecho, teniendo en cuenta la fragilidad del filamento (cargado con polvo metálico más del 50 % en volumen), se recomienda una máquina "Direct Drive", con una boquilla de 0,8 mm de acero para prevenir su obstrucción.

Esta modificación permite encontrar todos los parámetros de impresión antes de comprar una nueva herramienta de extrusión (desarrollada por Lynxter) – ver Figura 49.

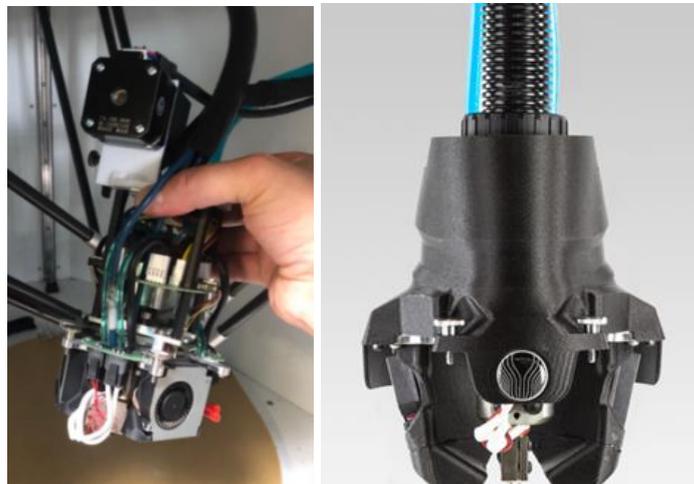


Figura 49. Modificación de la extrusión triple en Direct Drive

Gracias a la identificación de parámetros, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los parámetros establecidos son:

- Diámetro boquilla: 0,8 mm
- Multiplicador de extrusión: 115 %
- Anchura de extrusión: 0,8 mm
- Altura de capa: 0,2 mm
- Relleno: 100 %
- Borde exterior: 50 %
- Temperatura de la boquilla: 183 °C
- Temperatura de la mesa: 35 °C
- Temperatura de la cámara: 25 °C
- Enfriamiento: 10 %
- Velocidad: 15 mm/s

RECHERCHE DES PARAMETRES INITIAUX																			
Test N°	Extruder			Layer					Infill					Temperature			Cooling LayerZ%	Speed mm/s	Commentaires
	Nozzle	Distraction multiplier	co extrusion width/ mm	layer/mm	Top Solid	bottom Solid	Outline Perimete	Internal Fill	External Fill	Interior Fill	Outline Overlap	Infill Extrusion	T °c base	T °c plateau	LayerZ%				
1	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament		
2	0.8	1.3	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament		
3	0.8	1.3	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament		
4	0.8	1.3	0.96	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament		
5	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	30	0	15	couche anachéelgrinding sur filament		
6	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	30	0	15	Pas d'adhérence sur plateau		
7	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	35	0	15	dimensionnel ok avec optimization point		
8	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	35	0	15	dimensionnel ok avec Random point		
9	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	50	45	100	180	35	0	15	Défaut cohésion couche		
10	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	35	0	15	Défaut cohésion couche		
11	0.8	1.07	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	35	0	15	Défaut cohésion couche		
12	0.8	1.1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	35	0	15	Défaut cohésion couche		
13	0.8	1.12	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	100	45	100	180	35	0	15	cohésion couche Perfectible		
14	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	180	35	0	15	cohésion couche Perfectible entre perimetre et remplissage grinding sur filament		
15	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	104	180	35	0	15			
16	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	180	35	0	15	Bonne cohésion couche Première		
17	0.8	1.16	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	180	35	0	15	Pas bonne cohésion centre Solid et grinding sur filament		
18	0.8	1.16	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	183	35	0	15	Nommage Buse en Near-brass		
19	0.8	1.15	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	183	35	200%	15	Première délimité		
20	0.8	1.16	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	183	35	200%	15	Bonne cohésion de couche		

Figura 50. Identificación de parámetros.

2) Ensayos de impresión + eliminado del ligante + sinterizado

Se han imprimido varias muestras incluyendo:

- Cubos.
- Paredes (para ver el espesor máximo que puede ser tratado para eliminar el ligante y sinterizado).
- Cilindros.
- Cubo con agujero interno.
- Estructura reticular.
- Muestras para tracción.
- Cilindros con canales internos – iteración con rediseño para ver la calidad de la impresión.

- “Barco” para validar una buena impresión.
- Etc.

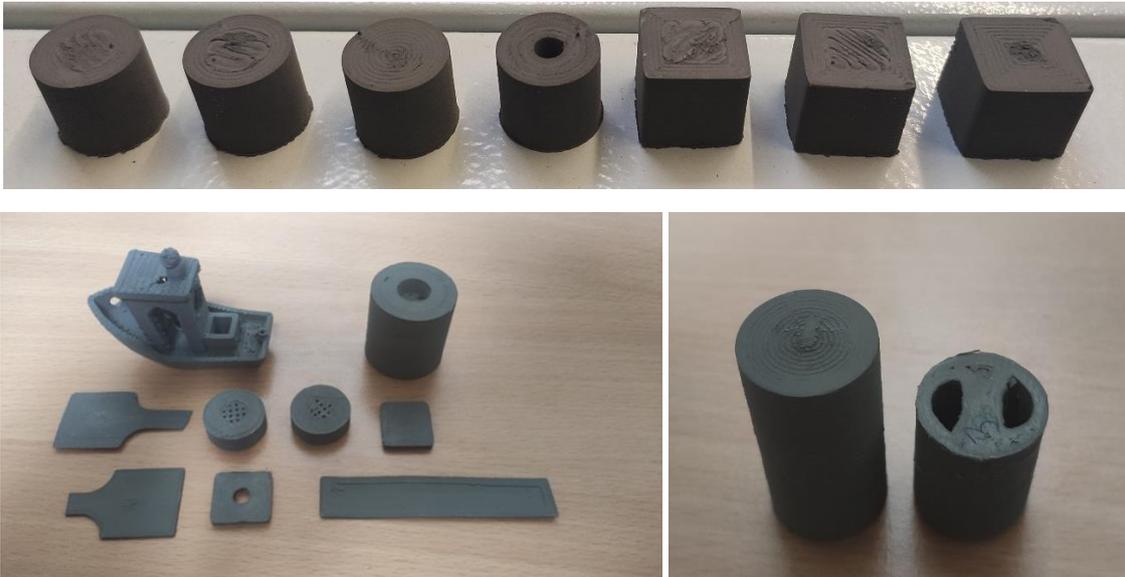


Figura 51: Muestras imprimidas.

ESTIA Addimadour tiene un horno cúbico proporcionado por Lynxter para las pruebas iniciales. Este horno está compuesto por paredes porosas con la posibilidad de tener una atmósfera inerte y alta temperatura (ver Figura 52).



Figura 52. Horno para las primeras pruebas.

El proveedor del filamento ha facilitado las curvas para el eliminado del ligante y el sinterizado para cada material. Para la pieza de acero H13, son necesarias 91 horas, ver Figura 53.

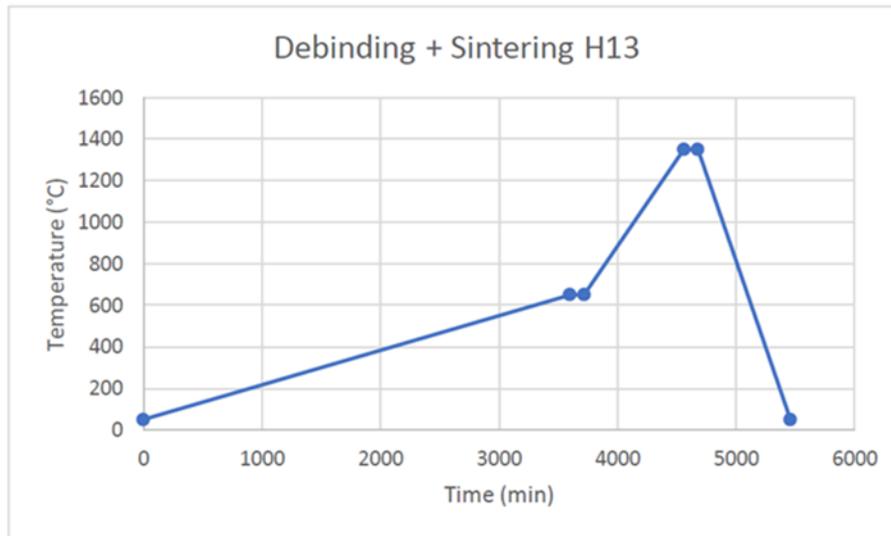


Figura 53. Curva propuesta para el eliminado del ligante y sinterizado. Del H13.

Tras numerosos ensayos, el horno no da buenos resultados, dando lugar a: ver Figura 54.

- Grietas,
- Burbujas,
- Deformaciones,
- Residuos poliméricos / carbonización,
- etc.

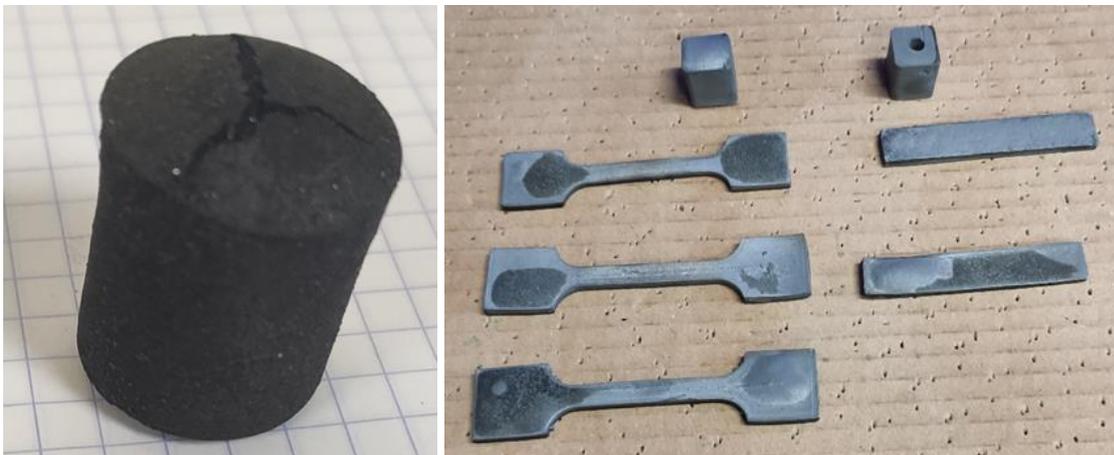


Figura 54. Muestra de los problemas encontrados tras el tratamiento térmico de eliminado de ligante y sinterizado.

Para concluir con este equipo, la duración de ciclo de 91 horas es demasiado largo y se debería acortar para ser competitivo. Además del elevado consumo eléctrico, este ciclo implicar un gran gasto de: A 1,6 L/min, se necesita aproximadamente 8800 L por ciclo, lo que supone aproximadamente 1 botella de gas de 50 L a 200 Bar.

Además, la pieza tiene unas propiedades mecánicas pobres tras la impresión. No se recomienda para esta aplicación un horno cúbico de paredes porosas. El eliminado del ligante es una operación clave del proceso. Esta operación es crítica para evitar daños físicos (agrietamientos) y químicos (carbonizado) en la pieza. Una gran parte de los defectos que aparecen tras el sinterizado se generan tras un eliminado del ligante inadecuado.

3) Impresión de las muestras para mejorar el eliminado del ligante y sinterizado

Para mejorar la calidad del eliminado del ligante y de la fase de sinterizado y para cubrir toda la cadena de valor de esta tecnología, se ha fabricado muchas muestras con la máquina Lynxter S600D y se han caracterizado en CEIT, ver Figura 55.



Figura 55. Muestras para mejorar el eliminado del ligante y sinterizado.

3.1) Optimización del proceso de eliminado del ligante

Para elegir el ciclo de eliminado del ligante se ha llevado a cabo un ensayo de termogravimetría (TGA), Figura 56. Este ensayo muestra la masa de ligante perdida mediante el ciclo aplicado (velocidad de calentamiento de 5 °C/min hasta 1000 °C en atmósfera de H₂). La primera curva (naranja) se aplicó en una muestra en verde y muestra dos áreas de gran pérdida de masa (a 275 °C y 375 °C). la masa total perdida de esta muestra fue de 9,2 % a la temperatura de 500 °C.

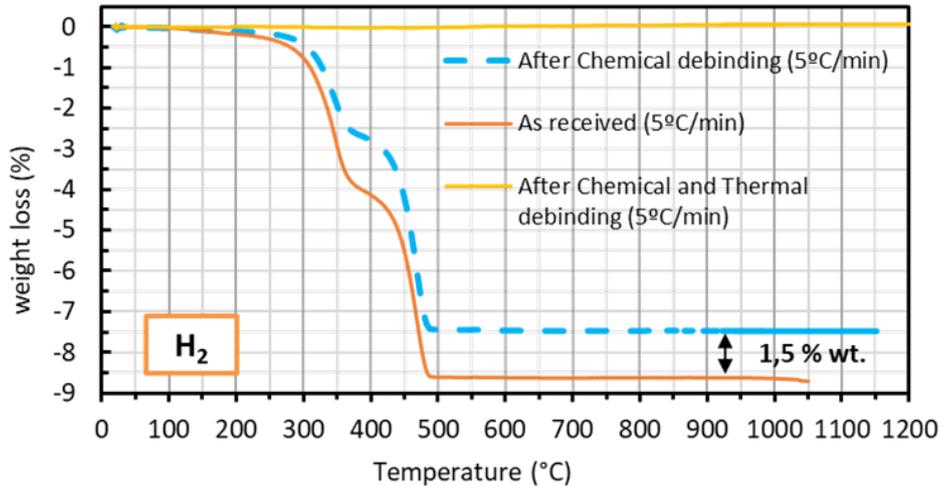


Figura 56. Resultados de termogravimetría de las muestras de H13. Naranja: ciclo TGA de la muestra en verde; Azul: ciclo TGA tras el ciclo de eliminado del ligante químico; amarillo: ciclo tras el eliminado térmico y químico del ligante.

Teniendo en cuenta los resultados del TGA, se diseñó un ciclo de eliminado del ligante con dos etapas de mantenimiento de temperatura (a 275 y a 375 °C) y una temperatura máxima de 550 °C, para asegurar un eliminado total del ligante. En un primer intento, la velocidad de calentamiento usada fue de 1 °C/min. Sin embargo, era demasiado rápida ya que aparecieron grietas y se deformó (Figura 57). Por ello, el ciclo se optimizó reduciendo la velocidad de calentamiento a 0,5 °C/min, ver Figura 58.



Figura 57. Muestra de H13 con un calentamiento de 1 °C/min.

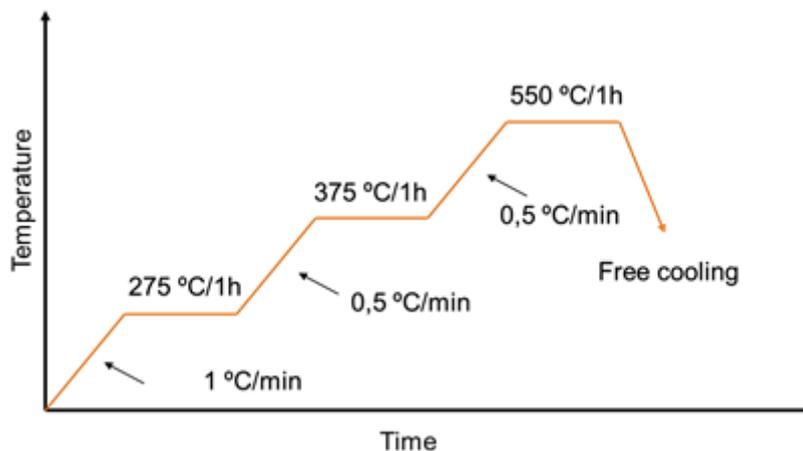


Figura 58. Ciclo de eliminado del ligante para las muestras de H13 diseñado con los resultados del TGA.

Aunque las grietas desaparecieron tras el nuevo ciclo, las muestras presentaban deformación y burbujas (Figura 59 a), y se añadió un nuevo paso de eliminado químico del ligante antes del tratamiento térmico.

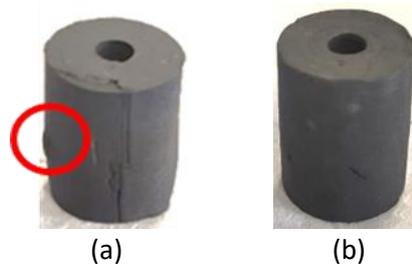


Figura 59. Muestras de H13 tras el eliminado térmico del ligante (a) y tras el eliminado químico + térmico del ligante (b).

Para el eliminado químico del ligante, las muestras se sumergen completamente en isopropanol (alcohol etílico) durante 5 h a 55 °C, ver set up de laboratorio en la Figura 60. Los análisis TGA hechos a las muestras con el eliminado químico del ligante mostraron el mismo comportamiento que las muestras en verde, con dos pendientes diferentes pero con menos cantidad de ligante perdido (1,5 % en peso), Figura 56 curva azul. Aunque la diferencia de masa es muy pequeña, este paso permite eliminar el ligante de una manera más sencilla con el eliminado del ligante térmico posterior y por ello las muestras mantienen la geometría estable sin presencia de burbujas, Figura 59 b.



Figura 60. Set up del laboratorio para el eliminado químico del ligante.

Finalmente, gracias al empleo del eliminado químico del ligante, el eliminado térmico del ligante optimizado se simplificó eliminando las dos etapas de mantenimiento como se muestra en la Figura 61. Este eliminado térmico del ligante se hizo en un horno Limberg de Ceit con un tubo metálico con tubos de entrada y salida para la circulación

del gas. Los ciclos se hicieron en atmósfera Arcal (97,5 % Ar y 2,5 % H₂). Tras este ciclo las muestras se volvieron a introducir en el TGA (línea amarilla en la Figura 56) confirmando que el ligante se había eliminado por completo con este ciclo térmico optimizado y simplificado.

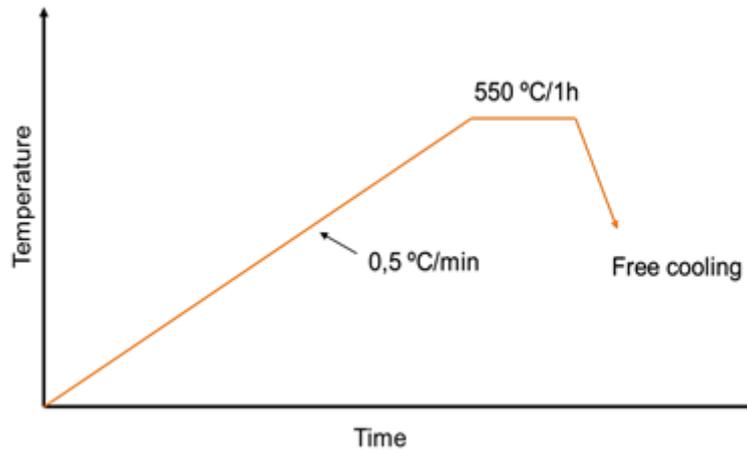


Figura 61. Eliminación térmica del ligante tras el eliminación químico del ligante.

3.2) Optimización del proceso de sinterizado

El sinterizado de las muestras de H13 tras eliminación químico y térmico del ligante se llevó a cabo en un horno MRF. Se aplicaron 2 tratamientos térmicos (1350 °C y 1400 °C) con las mismas condiciones, mantenimiento de 2 horas y atmósfera Arcal (97,5 % Ar y 2,5 % H₂). La diferencia obtenida con los 2 ciclos de sinterizado se explica en el Entregable “2.1.1. Informe del material para la FAM”.

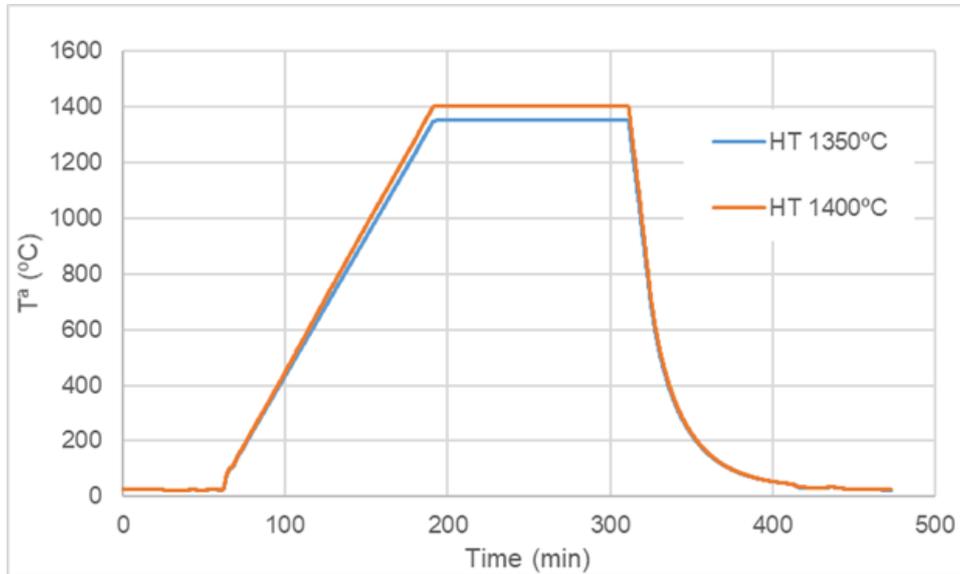


Figura 62. Ciclos de sinterizado (1350 °C y 1400 °C) aplicados a las muestras de H13 tras el eliminado químico y térmico del ligante.

3.3) Ciclos HIP

Adicionalmente, para conseguir una mayor densificación y eliminar la porosidad interna del material, se hizo un ciclo de HIP (Hot Isostatic Press) a 1150 °C y 150 MPa (presión aplicada con argón) con un mantenimiento de 2 horas, velocidad de calentamiento de 10 °C/min y enfriamiento al aire (ver Figura 63).

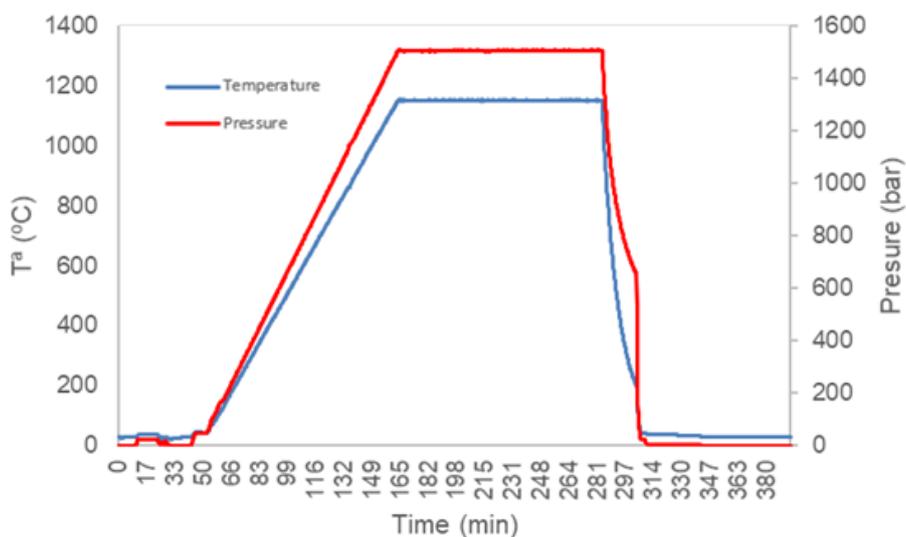


Figura 63: Ciclo de HIP: 1150 °C, 2 h, 150 MPa, velocidad de calentamiento a 10 °C/min y enfriamiento al aire.

3.4) Validación de los componentes

Los resultados de la validación del componente se muestran en el Entregable 2.1.1.

4) Rediseño de la pieza

El caso de uso propuesto por la empresa SOMOCAP tiene un canal de refrigeración interno convencional (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Sin embargo, este canal simple no es suficiente para una refrigeración eficiente: durante la fase de enfriamiento la parte polimérica muestra una ovalización. El uso de las tecnologías de fabricación aditiva da opción a realizar un Sistema de enfriamiento conformado. Por ello, se ha realizado un rediseño de los canales internos como muestra la Figura 64.

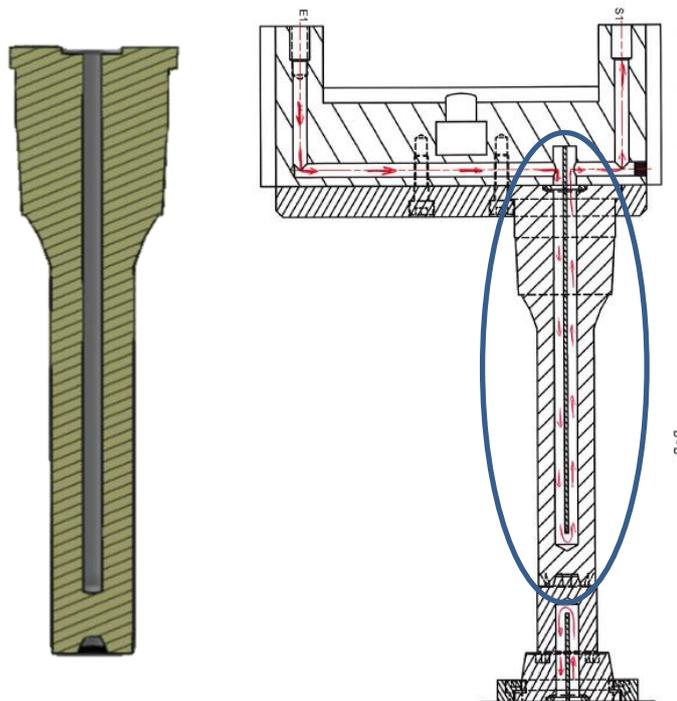


Figura 64. Diseño original de la refrigeración.

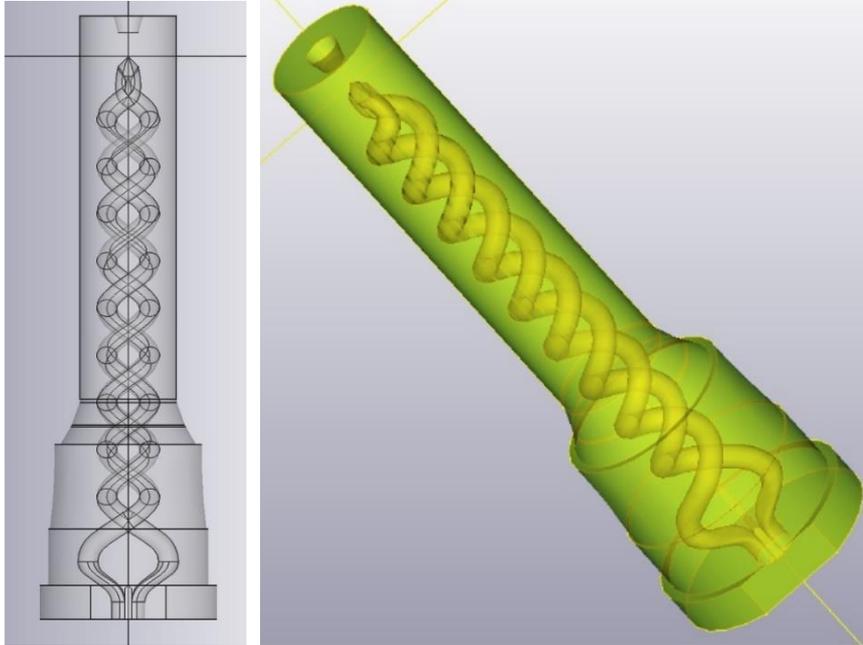


Figura 65. Refrigeración conformada.

Al igual que con otras tecnologías de FAM, es necesario añadir un sobreespesor para el mecanizado externo de la superficie funcional.

En este caso, se han añadido 2 mm (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) para:

- Asegurar material suficiente para mecanizar la superficie.
- Anticipar posibles deformaciones tras el eliminado del ligante y en sinterizado.

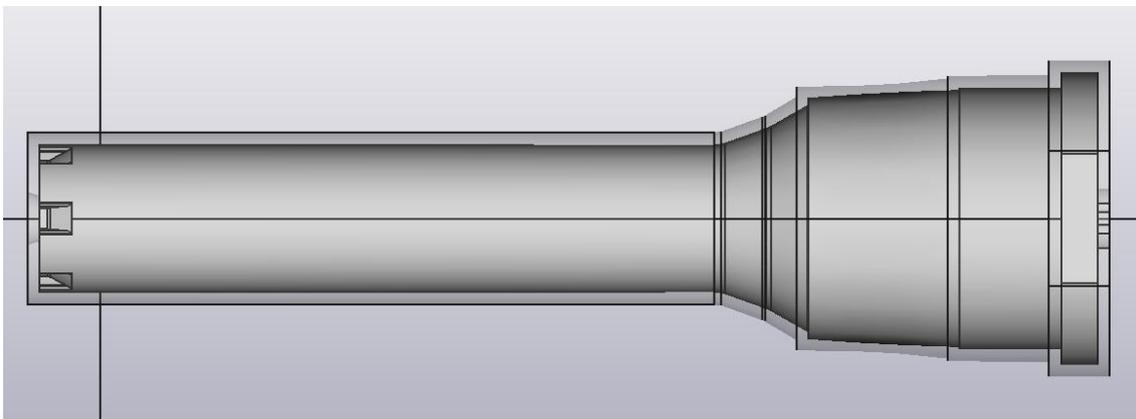


Figura 66. Sobreespesor para el mecanizado.

Para las piezas fabricadas por el proceso FFF con la máquina de Markforged Metal X se ha seguido la siguiente metodología:

- Fabricación de las muestras con ambos materiales: 17.4-PH y H13.

Las probetas de tracción fabricadas en la orientación horizontal, las muestras de dilatometría, las muestras de HIP con forma cilíndrica y un hueco en el centro y las muestras para el estudio microestructural se muestran en la Figura 67.



Figura 67. Muestras para la caracterización de tracción, microestructural, dilatometría y tras tratamiento por HIP.

- Selección de parámetros

Tabla 5. Parámetros seleccionados para la fabricación de muestras.

Altura de capa (mm)	0,125
Método de relleno	Sólido
Espesor del contorno (mm)	0,5-2
Espesor de techo y suelo (mm)	0-2

- Rediseño

El demostrador se tiene que fabricar en la orientación horizontal debido a la restricción de altura de la cámara de fabricación. Por ello, los canales internos se han tenido que adaptar para evitar soportes en su interior. La adaptación consiste en aplicar una forma de gota, lo que significa una forma autosoportable.

- Fabricación de detalles para comprobar la integridad de los canales y la ausencia de soportes en su interior.

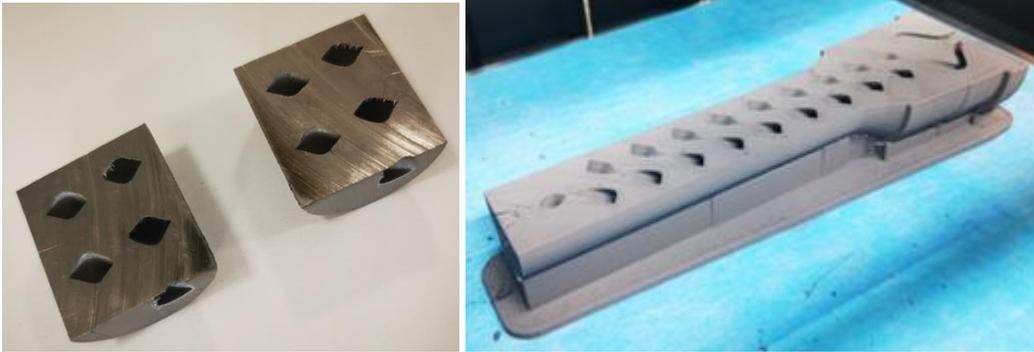


Figura 68. Detalles de los canales internos adaptados.

- Fabricación de los demostradores en ambos materiales.



Figura 69. Demostrador fabricado.

- Mecanizado para eliminar el sobreespesor de 2 mm de la superficie externa y obtener una superficie lisa.



Figura 70. Demostrador mecanizado.

Las lecciones aprendidas durante el desarrollo de este caso de uso son:

- Respecto a la máquina Markforged, es muy cerrada, por lo que el proceso no se pueden hacer mejoras o modificaciones. Debido a las restricciones dimensionales de la cámara de fabricación y del horno, se ha tenido que fabricar en horizontal y por tanto ha sido necesario un rediseño adicional de los canales internos para evitar soportes.
- El HIP ha ayudado a cerrar la mayoría de los poros consiguiendo alrededor de un 98 % de densidad. Por ello, las propiedades mecánicas han mejorado en gran medida.

Piloto PT2-VIDRIMOLDE

Fabricación

Fabricación del cuerpo principal por L-PBF

El molde del Piloto PT2 se ha fabricado en 2 pasos. Primero, se ha fabricado el cuerpo principal por L-PBF, en una empresa local (DRT), debido al tamaño de la pieza. Para ello, se ha empleado el polvo EOS StainlessSteel CX, un “acero de herramienta caracterizado por tener una buena resistencia a la corrosión combinada con alta resistencia y dureza.”^[1]. Segundo, a ese cuerpo se le añaden capas de Inconel 718 mediante Laser Directed Energy Deposition (L-DED).

[1] EOS, EOS StainlessSteel CX Material data sheet.

Antes de la fabricación de la pieza, se ha analizado el polvo y se han fabricado probetas por L-PBF para realizar los ensayos de deposición con L-DED. Los resultados de esta primera tarea se pueden consultar en el Entregable E.2.1.1. Informe del material para FAM. Los resultados de los ensayos de deposición se describen a continuación.

Ensayos de deposición por L-DED

Los ensayos de deposición se realizaron en la máquina de Trumpf TruLaser Cell 3000, en base a los parámetros mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros del proceso de L-DED.

Parámetro	Valor
Velocidad (m/min)	0,4
diámetro del spot (µm)	2000
Modo de salida del láser	Anillo
Potencia del láser (W)	800
Densidad de potencia superficial (W/mm ²)	255

Flujo del polvo (g/min)	5
Flujo del gas transportador (l/min)	4 (He)
Flujo del gas de la boquilla (l/min)	15 (Ar)

La investigación siguiente caracteriza la hibridación de los procesos de L-DED y L-PBF. Los objetivos de este trabajo son obtener los siguientes parámetros de proceso:

- Espesor de capa para recubrir la estructura de retícula interna. El objetivo es reducir este espesor evitando la creación de defectos internos.
- Parámetros de fabricación para el proceso de L-DED: potencia del láser (P), velocidad de alimentación (F) y flujo del polvo (Q).

Metodología: deposición de cordón unitario

Se han realizado los ensayos con cordones unitarios, con los parámetros descritos en la Tabla 7 sobre sustratos de diferente espesor: 6, 1 y 0,7 mm—Tabla 8. los cordones fabricados tienen una longitud de 25 mm y están centrados en una superficie de 15 mm x 32 mm.

Tabla 7. Conjunto de parámetros de referencia del proceso L-DED.

	P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)	P/F
Ref.	600	525	5.5	1.143
Reduced	500	525	5.5	0.952

Tabla 8. Plan de ensayos de cordones unitarios.

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
1	Single bead	Ref.	6
2	"	Reduced	6
3	"	Ref.	1
4	"	Reduced	1
5	"	Reduced	0.7

Metodología: cordones solapados

Se han realizado ensayos de capas utilizando los parámetros reducidos en sustratos de 2 y 1 mm de espesor – Tabla 9. Estas capas consisten en 5 cordones solapados con una distancia de 1 mm entre ellos. Para simular el efecto en la fabricación de un área de deposición mayor, se ha dejado un tiempo de espera entre cordones depositados de 5 segundos.

Tabla 9. Parámetros para los ensayos de deposición de capas.

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
6	Layer	Reduced	2
7	"	Reduced	1

Metodología: pared cordón unitario

Se ha llevado a cabo la fabricación de la pared de cordones unitarios con los parámetros reducidos sobre un sustrato de 2 mm de espesor (Tabla 10). La pared consiste en 20 capas de cordones depositados en la misma dirección con un tiempo de espera de 10 segundos entre capas.

Tabla 10. Parámetros para la fabricación de la pared.

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
8	Wall	Reduced	2

Tras los ensayos previos, se ha llevado a cabo un trabajo de caracterización metalográfica y medidas de la deformación causada por las tensiones residuales propias del proceso, en las muestras fabricadas.

Resultados de los ensayos de deposición: ensayos de cordones

La Figura 71 muestra el análisis metalográfico de la intercara entre el sustrato de L-PBF y el cordón de L-DED.

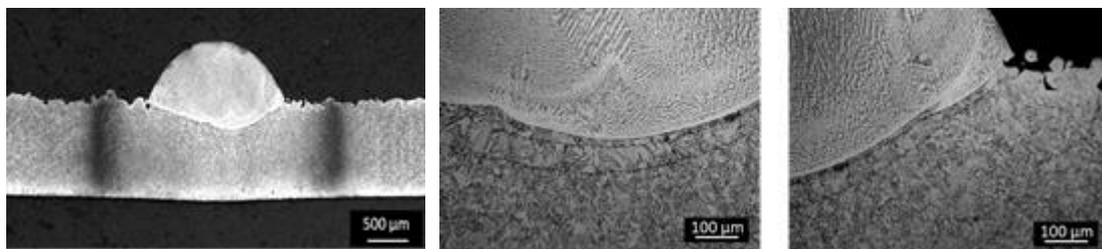


Figura 71. Intercara entre L-PBF / L-DED.

Observando la Figura 71 a la derecha, se pueden ver dos líneas pertenecientes a una discontinuidad del sustrato, siguiendo la línea de dilución. Esto puede indicar la formación de micro grietas en el sustrato.

La Tabla 11 muestra el espesor de la Zona Afectada Térmicamente (ZAT). Cuando el sustrato es más tiene menos espesor, la ZAT es mayor.

Tabla 11. Medidas de la ZAT para los ensayos 4 y 5.

N.	Substrate thickness (mm)	HAZ Measurements (mm)
4	1	2.89
5	0.7	3.88

Resultados de los ensayos de deposición: Ensayos de las capas

La Figura 72 muestra la sección de la capa depositada sobre los sustratos con espesor de 2 mm (arriba) y de 1 mm (abajo). Se puede observar que los parámetros óptimos de proceso para L-DED sobre sustratos de L-PBF son los reducidos.

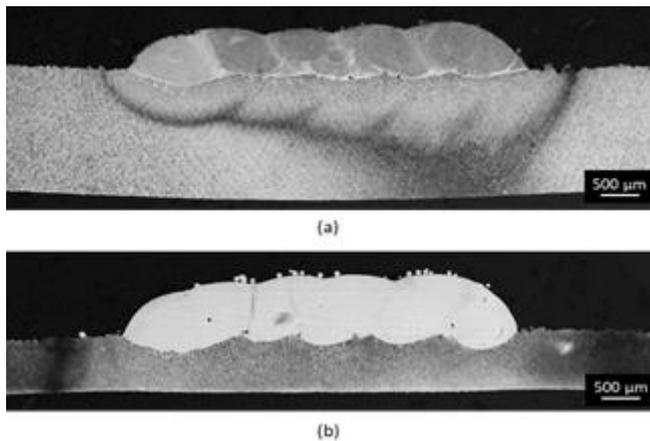


Figura 72. Secciones de las capas fabricadas (a) referencia parámetros 6, y (b) referencia parámetros 7.

En la Figura 73 se pueden ver las muestras 6 y 7. La muestra con los parámetros 7, se ha deformado considerablemente como ilustra la Figura 74. Se concluye que el sustrato de 1 mm de espesor da lugar a grandes deformaciones.



Figura 73. Muestras 6 y 7.

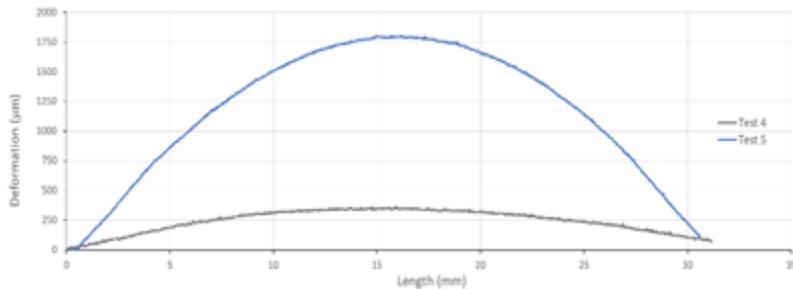


Figura 74. Medida de la deformación vertical de las muestras 6 y 7.

Resultados de los ensayos de deposición: Paredes

La sección de la pared fabricada con cordones unitarios se muestra en la Figura 75. dado que el espesor del sustrato es mayor que el utilizado para las pruebas (2mm), la ZAT es más reducida.

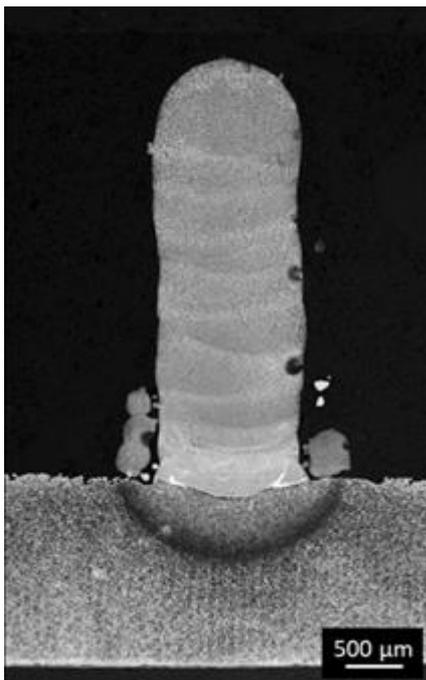


Figura 75. Sección de la pared 8.

Resultados de los ensayos de deposición: Temperatura durante la fabricación

La Figura 76 muestra el análisis de la temperatura durante la fabricación de las muestras 4 y 5. Cuanto más fino es el espesor del sustrato mayor es la temperatura acumulada.

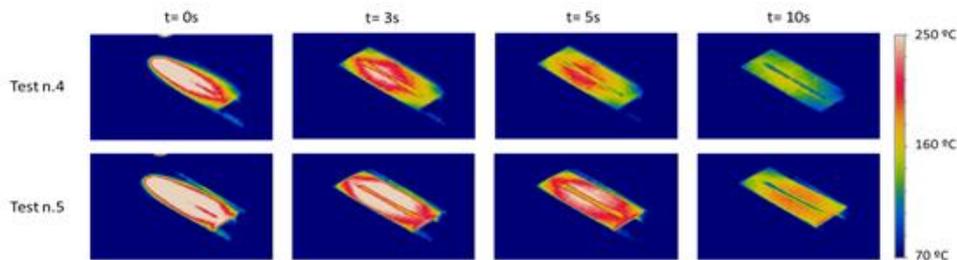


Figura 76. Análisis de la temperatura durante la fabricación de las muestras 4 y 5.

La Figura 77 muestra el perfil de temperaturas del baño fundido durante la fabricación de la muestra 4. Se puede ver que la temperatura del baño fundido se mantiene entre los 2000-2300 °C.

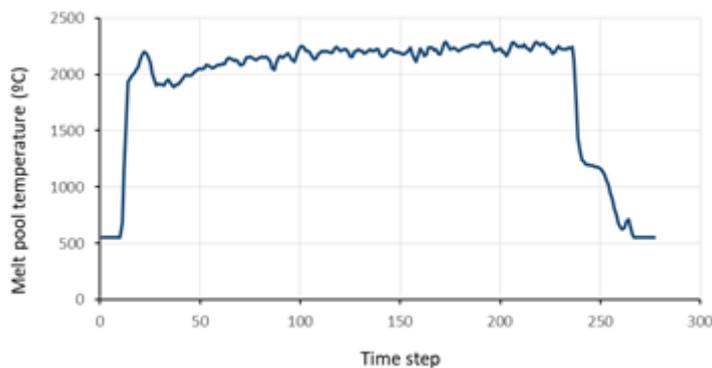


Figura 77. Perfil de temperaturas del baño fundido durante la fabricación de la muestra 4.

Resultados de los ensayos de deposición: Conclusiones

Los parámetros óptimos de deposición de material sobre sustratos finos son: potencia del láser (P) 500 W, velocidad de alimentación (F) 525 mm/min y flujo del polvo (Q) 5.5 g/.

Son estos parámetros, se pueden usar sustratos tan finos como 0,7 mm de espesor para la fabricación de coronas unitarios.

En el caso de deposición de capas, es posible realizar la deposición en sustratos de 1 mm de espesor, sin embargo, hay que tener en cuenta la deformación del sustrato.

Resultados de la fabricación

La Figura 78 muestra el molde tras su fabricación mediante L-PBF. La pieza se envió a UPV-EHU para la deposición por L-DED.



Figura 78. Molde fabricado por L-PBF.

La Figura 79 muestra el molde tras la deposición por L-DED.



Figura 79. Interior del molde tras la deposición por L-DED.

Post-procesado

El post procesado de la pieza fabricada por L-PBF consiste en la separación de la base, mediante EDM. Esto se hizo en la misma empresa (DRT) que tiene el equipamiento para esta tarea. No se han realizado tratamientos térmicos.

Las lecciones aprendidas en el desarrollo de este piloto son:

- Las técnicas de fabricación de vidrio por molde presentan algunos retos que hacen que la FAM sea en principio poco atractiva. Estos factores son el bajo precio del molde convencional y el corto tiempo de ciclo (generalmente 5 segundos) lo que deja poco margen de mejora.

- La fabricación de un molde para vidrio utilizando FA requiere tiempo y un coste inicial elevado. Pero la combinación de los procesos de L-PBF y L-DED permiten obtener un molde con una mejor respuesta térmica (debido a los canales internos de enfriamiento conformados) y probablemente una vida más larga ya que la superficie del molde está completamente recubierta con una aleación de níquel (mientras que en el caso de los moldes convencionales el recubrimiento sólo se realiza en los bordes de la superficie).
- Es necesario demostrar, a través de instalaciones piloto, la viabilidad de esta solución, particularmente por los fabricantes de piezas de vidrio. Es esperable que las reticencias del sector disminuyan.

**Interreg
Sudoe**



EUROPEAN UNION

ADDITool

European Regional Development Fund

www.additool.eu