

Interreg
Sudoe



ADDITool

European Regional Development Fund



D 2.3.1. INFORME ESTUDIO DE VIABILIDAD

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ESTUDIO TECNOLÓGICO Y ECONÓMICO	4
2.1. Piloto FR1- LAUAK.....	4
2.2. Piloto PT1-MOLDETIPO	14
2.3. Piloto SP1- MEUPE/INESPASA	20
2.4. Piloto FR2-SOMOCAP.....	25
2.5. Piloto PT2- VIDIRIMOLDE	31
3. CONCLUSIONES.....	36

1. INTRODUCCIÓN

Tras los resultados obtenidos en la Actividad 2.1 (Materiales para Fabricación Aditiva Metálica) y 2.2 (Fabricación, post-procesado y caracterización de demostradores), este documento pretende analizar la viabilidad tecnológica y económica de cada piloto desarrollado durante el proyecto ADDITOOL.

El objetivo principal de este estudio es comparar y analizar los resultados obtenidos durante el desarrollo de los casos de uso obtenidos mediante Fabricación Aditiva Metálica (FAM), con los procesos convencionales que se aplican en el entorno real de las PYMES. Concretamente:

- Estudio del proceso de fabricación convencional que utilizan las PYMES para la fabricación del utillaje objetivo.
- Análisis de viabilidad tecnológica para la implantación de procesos de fabricación aditiva adecuados para la fabricación de los componentes.
- Estudio económico de la implantación de FAM o modificación de los procesos añadiendo FAM y comparación de coste de pieza para obtener el caso de uso.
- Los beneficios que FAM ofrece en el proceso de producción del componente.

Los demostradores fabricados por los socios de ADDITOOL han sido ensayados en las instalaciones de cada empresa (pymes asociadas). El objetivo es validar o no la eficacia de utilizar tecnologías FAM en sus procesos productivos y comparar el rendimiento de esta, con la pieza original.

2. ESTUDIO TECNOLÓGICO Y ECONÓMICO

2.1. Piloto FR1- LAUAK

Antecedentes

Para el estudio del piloto FR1, LAUAK ofrece 2 plantillas, que se utilizan para controlar el buen estado de la chapa de un avión.

Estos dos útiles son originalmente obtenidos a partir del mecanizado de un bloque de acero 40CMD8T pretratado a 110MPa, acero con una buena maquinabilidad y un comportamiento mecánico favorable.

Las tolerancias de las superficies funcionales cumplen con la norma ISO 2768 mK con un Ra de 3.2 μm . En toda la pieza, las tolerancias son de 0.1mm +/-0.05.

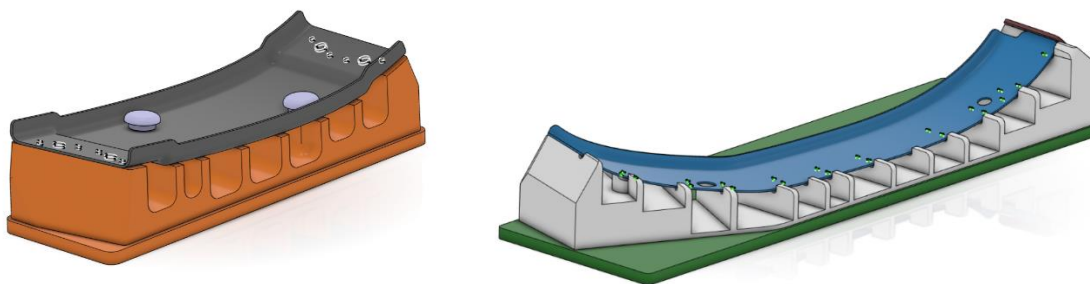


Figura 1. Componentes D54516181 & D54516298 suministradas por LAUAK

La pieza D54516181 (en naranja en la Figura 1) es producida internamente por la empresa LAUAK, que dispone de todos los medios necesarios para la fabricación de la pieza:

- Plazo de suministro de material: 1 semana – Bloque de 40CMD8T (200 x 100 x 50 mm)
- Mecanizados: Entre 15h y 20h y algunas herramientas de corte
- Coste: 1750€ incluyendo estudio / suministro de material / fabricación / control tridimensional.
- Ciclo de vida: 1000 piezas

La pieza D54516298 (en gris en la Figura 1) es de producción interna de la empresa LAUAK, que dispone de todos los medios necesarios para la fabricación de la pieza:

- Plazo de suministro de material: 1 semana – Bloque de 40CMD8T (600 x 200 x 100 mm)
- Mecanizado: más de 100h y muchas herramientas de corte

- Coste: 3500€ incluyendo estudio / suministro de material / fabricación / control tridimensional.
- Ciclo de vida: 1000 piezas

Objetivos del piloto

El objetivo de este piloto es triple:

- Mantener un precio de coste similar para la fabricación.
- Mantener un “tiempo a mercado” equivalente o reducido.
- Mejorar el rendimiento (aumentar la vida útil) mientras se reducen los costes y el tiempo de mecanizado.

Para cumplir con estos objetivos, el método que se utilizó ha sido:

- Caracterización del material: tanto de la materia prima como de la pieza fabricada, para cada tecnología
- Simulación de temperaturas y tensiones residuales durante la fabricación
- Fabricar estos dos útiles con 3 tecnologías diferentes:
 - DED wire laser: Componente D54516181 – Fabricación de la pieza completa
 - DED wire arc: Componente D54516298 – Fabricación de la pieza completa con rediseño.
 - DED powder laser: Componente D54516298: recarga para mejorar la dureza solo en la parte superior de la pieza (solo la parte en contacto con la parte del avión)
- Escaneo 3D de las piezas para ver deformaciones antes del tratamiento térmico y después del mecanizado.
- Tratamiento térmico
- Mecanizado
- Controles y pruebas en condiciones reales de uso

Selección del material

Siendo el material utilizado por LAUAK (40CMD8T) muy poco soldable, se acordó un cambio de material para hacerlo fabricable y mejorar sus prestaciones mecánicas, en especial su dureza. La mejora de la dureza permitirá así un incremento de la vida útil.

Tras un estudio de los materiales disponibles, se seleccionó el 15CrMnMoV5-4-9-3 (15CDV6) para la fabricación de estas piezas.

	Designation	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	A5 (%)	Hardness (HRC)	Available for Wire D1,2mm	Available for DED Powder 40-110microns	Weldability
Original	40CMD8 (40CrMnMoS8-6)	850	1000	11	32 - 34	No	?	No
Proposal	EN4334 (15CrMnMoV5-4-9-3) // AIR 9117 : 15CDV6	930	1080 - 1280	10	42	Yes		Yes
Proposal	EN4331 (25CrMnMo4-2-2) // AIR 9117 : 25CD4	750	880 - 1080	12	46	Yes		Yes
proposal	INVAR 36	679	717	5.5	98 (RCB)	YES	YES	YES

Figura 2. Selección de materiales

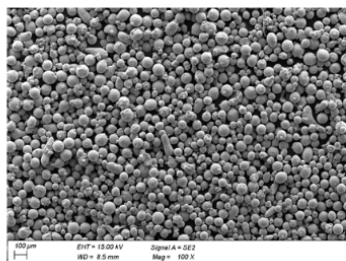
La Figura 2 muestra que el 15CDV6 tiene mejores prestaciones que el material original, con +10HRC y +80MPa en el Re. Este material está disponible en hilo por lo tanto adaptable para el proceso DED Wire Arc y con buena absorción con un láser en el infrarrojo por lo tanto posible para el DED Wire Laser.

Siendo el objetivo de este piloto la comparación de 3 procesos (DED Wire Laser, DED Wire Arc y DED Powder Laser), era necesario desarrollar un polvo de 15CDV6 que tuviera las mismas características químicas que el hilo, ver Figura 3.

CEIT: FR1_LAUAK

15CDV6 Powder

10 Kg of gas atomized 15CDV6 (AIR 9117) powder. +44-106 μ m particle size. [EN4334: 15CrMnMoV5-4-9-3]



Physical properties	
P _{pycnometry} (g/cm ³)	7,68 +/- 30
P _{apparent} (g/cm ³)	4,31
P _{TAP} (g/cm ³)	4,54
Flow rate (s/50g)	0,33

Interstitial level (wt.%)	
O	0,0126
N	0,0014
C	0,122
S	0,049

Specifications. Chemical Composition 15CDV6 (wt.)

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S	P+S
Min-Max	0,12-0,15	0,80-1,10	Max 0,20	1,25-1,50	0,80-1,00	0,20-0,30	Max 0,02	Max 0,0015	Max 0,04
Type	0,14	1,00	0,15	1,40	0,90	0,25	0,003	0,001	<0,040

Figura 3. Desarrollo de polvo 15CDV6

Los resultados de la caracterización del polvo están disponibles en el entregable D2.1.1 Informe de material para FAM.

Estudio de viabilidad

Como se detalló anteriormente, se utilizaron tres tecnologías para fabricar estas dos piezas:

- DED wire laser

- DED wire arc
- DED laser powder

La ventaja de usar la tecnología DED Wire Laser es tener una pieza lo más cerca posible de la geometría final (NNS: Near Net Shape) para disminuir el proceso de mecanizado y tener una alta tasa de rendimiento/deposición (más alta que las tecnologías de polvo).

El proceso DED wire arc hace posible tener una forma menos aproximada que la obtenida por DED wire laser pero con una tasa de deposición mucho más alta que los otros dos procesos.

Finalmente, el proceso DED laser powder es muy útil para la recarga de material en la pieza o para la funcionalidad de la pieza. Dado que las tasas de deposición son relativamente bajas, no existe un interés alto en fabricar estas dos piezas con esta tecnología. En este caso resultó rentable mecanizar un bloque de AISI 1045 que tiene la ventaja de tener un coste muy bajo y muy fácil de mecanizar y soldar, para luego añadir material (15CDV6) en las zonas útiles con el fin de aumentar la dureza superficial.

DED Wire Laser

La fabricación de la pieza LAUAK D54516181 se realizó con los siguientes medios:

- Robot COMAU NJ165
- Efecto PRECITEC CoaxPrinter
- Láser TRUMPF TrueDisk 6000 – 6kW
- Hilo SelectArc 15CrMnMoV5-4-9-3 // Diámetro 1.2mm

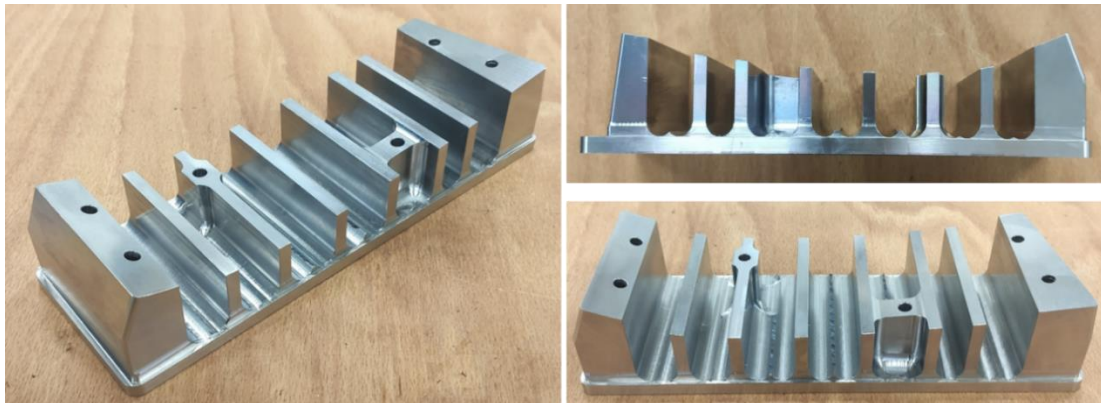


Figura 4. Componente fabricado con DED Wire Laser

La pieza ha sido revisada por LAUAK y cumple íntegramente los requisitos. La dureza se ha mejorado en comparación con la pieza original, lo que sugiere una mayor vida útil. Asimismo, las propiedades metalúrgicas son buenas, con desempeños similares o incluso superiores a un bloque forjado, ver Entregable D2.1.1 Informe de material para FAM.

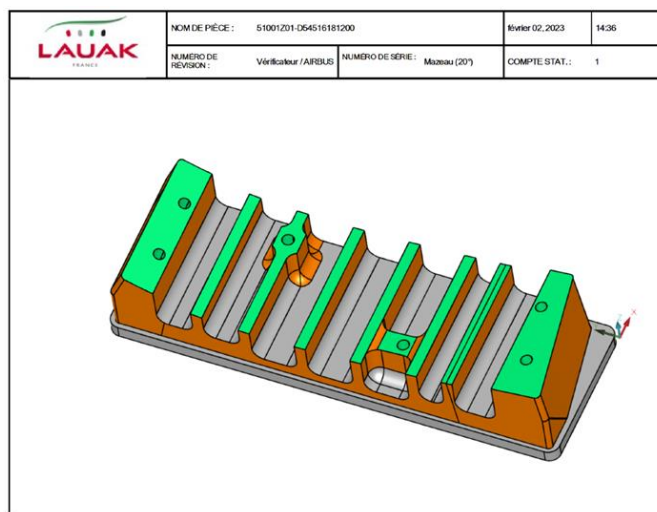


Figura 5. Control del componente realizado por LAUAK

Es difícil comparar los costes de fabricar una pieza en dos lugares y con dos modos diferentes de operación. Sin embargo, se presenta a continuación una estimación de precios basada en los gastos reales de subcontratación.

Descripción	Precio	Entrega
Suministro de sustrato 300 x 150 x 10mm	95€	3 semanas (se puede reducir)
Suministro de hilo (2.2kg)	215.5€ (98€/kg)	3 semanas (se puede reducir)
Programación	112.5€ (900€/día)	1h
Fabricación	412.5€ (1500€/día)	2.2h
Escaneo y tratamiento térmico	500€	8h
Mecanizado	1620€ (subcontratado) (puede reducirse considerablemente si se hace internamente)	5h mecanizado – 1 semana si se subcontrata
Control	-	1 semana (LAUAK)
Total	2955.5€	5 semanas, incluidas 4,9 semanas en suministro y subcontrataciones

Lo importante tener en cuenta en la fabricación de esta pieza con tecnología DED Wire Laser es:

- Tiempo de programación y fabricación del NNS en menos de 4 horas.
- El coste de 2955.5€ tiene en cuenta los 1620€ de subcontratación de mecanizados, pudiendo reducirse considerablemente.
- El tiempo de mecanizado del NNS es de solo 5 h en lugar de más de 20 h de un mecanizado a partir de un bloque, por lo que se reduce considerable del desgaste de la herramienta.
- El tiempo de suministro se puede reducir considerablemente para una empresa de producción.
- Las propiedades metalúrgicas son similares o incluso superiores a la forja, ver documento D2.1.1 Informe de material para FAM.

DED Wire Arc

La fabricación de la pieza LAUAK D54516298 se realizó con los siguientes medios:

- Robot FANUC Arcmate 120iC
- CMT Fronius TPSi
- Alambre SelectArc 15CrMnMoV5-4-9-3 // Diámetro 1.2mm

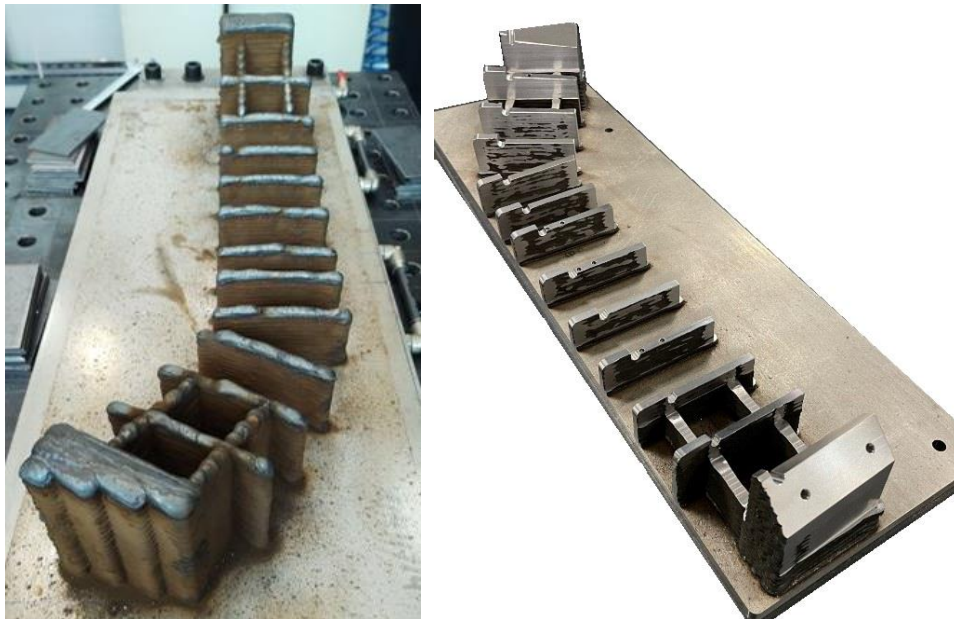


Figura 6. Componente fabricado con DED Wire Arc

La pieza también ha sido revisada y cumple con las necesidades de LAUAK. La dureza se ha mejorado en comparación con la pieza original, lo que sugiere una mayor vida útil. Asimismo,

las propiedades metalúrgicas son buenas, similares o incluso superiores a un bloque forjado, ver Entregable D2.1.1 Informe de material para FAM.

Pc		NOM DE PIÈCE : 51001201-054516208200					livier 14, 2023		09:54		
		NUMERO DE REVISION :			NUMERO DE SÉRIE : AVEC L'AMAGE		COMPTE STAT. : 1				
DEFAUT DE FORME 0.2 DES FACES DE DESSUS											
⊕ MM LOC1 - PNT1											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.024	0.024	0.000			
⊕ MM LOC2 - PNT28											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	-0.003	-0.003	0.000			
⊕ MM LOC3 - PNT27											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	-0.010	-0.010	0.000			
⊕ MM LOC4 - PNT26											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.037	0.037	0.000			
⊕ MM LOC5 - PNT25											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.037	0.037	0.000			
⊕ MM LOC6 - PNT24											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.092	0.092	0.000			
⊕ MM LOC7 - PNT23											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.088	0.088	0.000			
⊕ MM LOC8 - PNT22											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.045	0.045	0.000			
⊕ MM LOC9 - PNT21											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.050	0.050	0.000			
⊕ MM LOC10 - PNT20											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.017	0.017	0.000			
⊕ MM LOC11 - PNT19											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.019	0.019	0.000			
⊕ MM LOC12 - PNT18											
AX		VAL. NOM.		+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
T		0.000		0.100	-0.100	0.002	0.002	0.000			

Figura 7. Control realizado para la pieza DED Wire Arc

De la misma manera que en DED Wire Laser, es difícil comparar los costes de fabricación de una pieza en dos lugares y con dos modos de operación diferentes. Sin embargo, se presenta a continuación una estimación de precios basada en los gastos reales de subcontratación.

Descripción	Precio	Entrega
Suministro de sustrato 650 x 250 x 14 mm	194 €	1 semana (puede haber en stock)
Suministro de hilo (5.9 kg)	527 € (90 €/kg)	3 semanas (puede haber en stock)
Programación	112.5 € (900 €/día)	1 h
Fabricación	1312.5 € (1500 €/día)	7 h (2.3 h que se puede reducir)
Escaneo	100 €	1 h
Mecanizado	3470 € (subcontratado) (puede reducirse considerablemente si se entrena al personal)	3 semanas de subcontratación (problemas de distorsiones)
Control	-	1 semana (LAUAK)
Total	5716 €	8 semanas (se puede reducir a 1 semana)

Lo importante tener en cuenta en la fabricación de esta pieza con tecnología DED Wire Arc es:

- El tiempo para programar y fabricar NNS ha sido 7 horas, incluidas 2.3 horas de tiempo de permanencia, con una tasa de deposición de 3.3 kg/h.
- El coste de 5716€ incluye los 3470€ de subcontratación en mecanizado y pudiendo reducirse mucho si se hiciera más formación para mecanizar este tipo de piezas (NNS).
- El tiempo de mecanizado de NNS es de solo 20 horas en lugar de más del triple o incluso el cuádruple de un mecanizado a partir de un bloque, reduciendo el desgaste de la herramienta: en total, más de 40 kg de ahorro de material.
- El tiempo de entrega se puede reducir considerablemente para una empresa de producción a 1 semana como máximo.
- Las propiedades metalúrgicas son similares o incluso superiores a la forja, ver documento D2.1.1 Informe de material para FAM.

- Gran ahorro de material, menor trabajo de mecanizado y la posibilidad de uso de estas tecnologías para la reparación, contribuye a la sostenibilidad.

DED Powder Laser

La fabricación de la pieza LAUAK D54516298 se realizó con los siguientes medios:

- DED Trumpf Trucell 300 + Láser de disco de 3kW.
- Alimentador de polvo con cabezal coaxial
- Polvo Desarrollado por CEIT como parte de ADDITool - misma química que el hilo
- Bloque mecanizado de AISI 1045

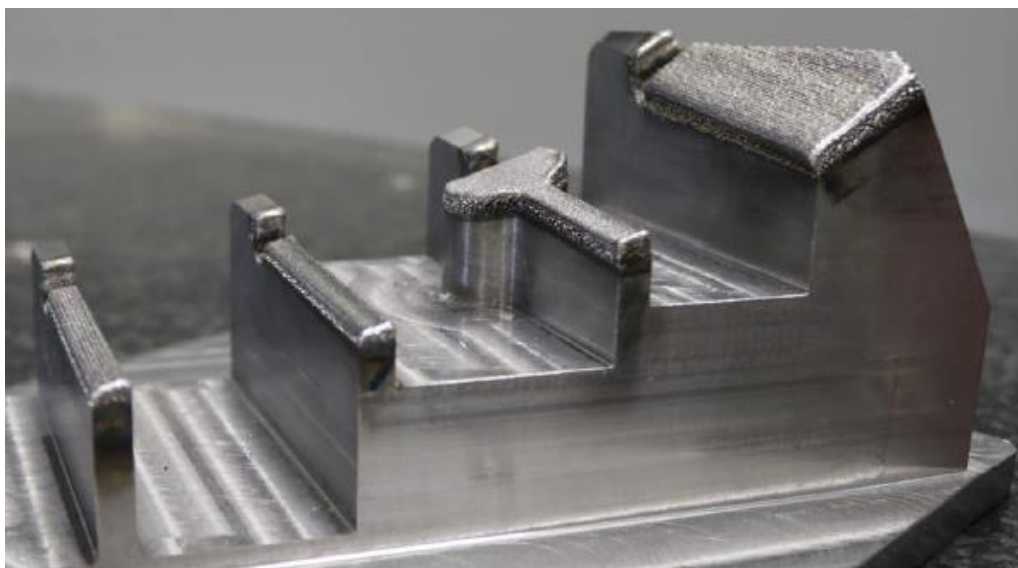


Figura 8. Componente fabricado por DED Powder Laser

Esta pieza no se revisó porque solo se mecanizó parcialmente para que sirviera como demostración para el proyecto. Por otro lado, también se ha mejorado la dureza en comparación

con la pieza original, lo que sugiere una mayor vida útil: 39HRC en la superficie y 18HRC en el sustrato. En términos de costes, a continuación se presenta una estimación:

Description	Price	Delay
Suministro de sustrato 570 x 175 x 95 mm	148 €	1 semana
Suministro de polvo (0,33kg depositado con 70% eficiencia)	85.8 € (200€/kg)	4 semanas (se puede reducir)
Programación	726 € (900€/día)	6.5 h
Fabricación	311.25 € (1500€/día)	1.66 h
Mecanizado	1,829.00 € (subcontratado) (se reduce si se hace internamente)	7h mecanizado – 4 semanas subcontratación
Control	-	1 semana (LAUAK)
Total	3,100.00 €	9 semanas (4 suministro y 4 en subcontratación)

Lo importante tener en cuenta en la fabricación de esta pieza con tecnología DED Powder Laser es:

- Tiempo de fabricación NNS en menos de 2 horas.
- El coste de 3100€ tiene en cuenta los 1829€ de subcontratación de mecanizados y que se pueden reducir considerablemente.
- El coste de la materia prima se reduce considerablemente con este proceso. Además, este proceso permite una reparación si la herramienta se ha desgastado y ha perdido sus dimensiones.

2.2. Piloto PT1-MOLDETIPO

Antecedentes

Los canales de enfriamiento conformado, es decir, los canales de enfriamiento que están diseñados para coincidir estrechamente con la geometría de la pieza y así mejorar su enfriamiento, ya se han obtenido mediante tecnologías FAM para moldes para plásticos, con resultados significativos.

En estas aplicaciones, el grado de optimización alcanzado en el comportamiento térmico del molde se traduce en un ritmo de producción muy superior, reduce los costes de producción y, por tanto, aporta un importante valor añadido al molde.

La pieza propuesta es un inserto para molde de inyección, utilizado en la fabricación de una pieza bimaterial (POM + Elastómero Termoplástico). Este inserto funciona en conjunto con otro inserto, como pareja para dar forma a la pieza. Sin embargo, esto último no será estudiado, en aras de la simplicidad. El molde en sí tiene 2 juegos de insertos. Junto con la rotación del molde, permitiendo la inyección de 2 materiales simultáneamente.

Los insertos funcionan como movimientos laterales, resaltados en el molde – Figura 10. El molde está diseñado para producir 2 piezas en cada toma. Como se mencionó, solo se produjo un inserto mediante fabricación híbrida, mientras que el otro inserto y el segundo conjunto de insertos se produjeron por medios convencionales. Esto permitió una comparación de su funcionamiento sin tener que cambiar las inserciones. Los componentes tienen una base (gris en la figura) que, por su geometría, podría fabricarse con fabricación híbrida convencional. En este último caso, cada inserto se puede fabricar en 2 piezas separadas, que luego se ensamblan, o se puede fabricar la base de forma convencional y luego construir la parte activa encima de ella, mediante una tecnología de fabricación aditiva.

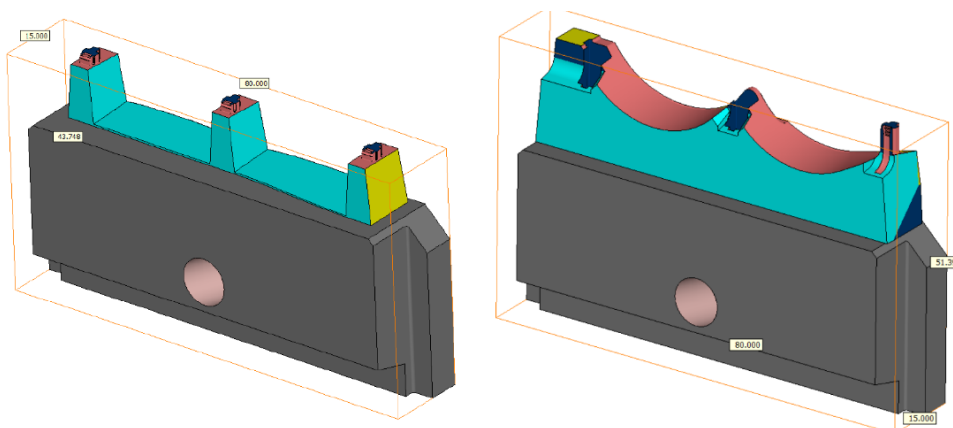


Figura 9. Los insertos que trabajan en conjunto para dar forma a la pieza. Solo el inserto de la derecha fue estudiado y producido mediante fabricación híbrida: mecanizado + SLM.

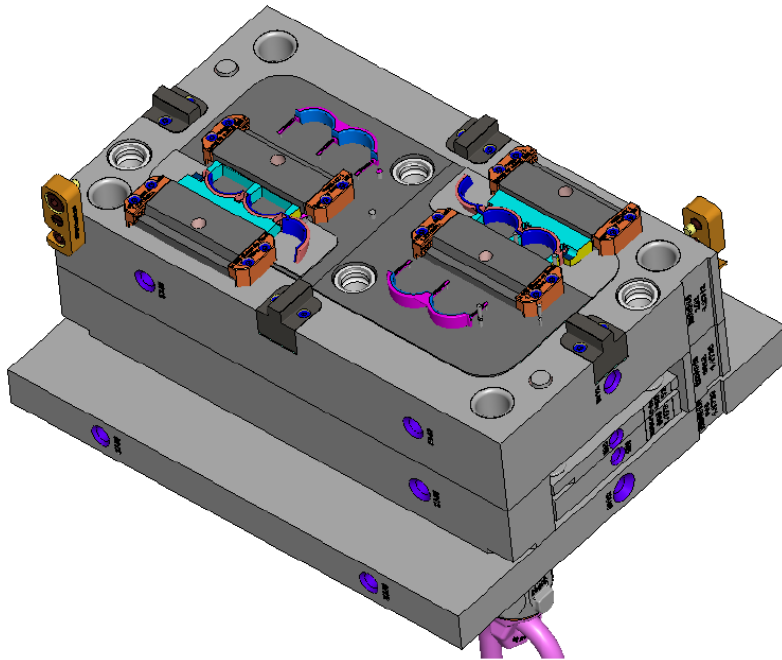


Figura 10. El molde donde se ensamblan los insertos. Los insertos de color azul claro son mecanismos deslizantes. Uno de ellos será fabricado mediante un proceso híbrido.

Objetivos del piloto

El caso de estudio propone optimizar el enfriamiento del inserto, agregando canales de enfriamiento conformados. La pequeña dimensión de la zona a enfriar en este caso hace muy difícil la fabricación de canales de enfriamiento conformados para procesos convencionales. Esto es posible al fabricarlo con Laser Powder Bed Fusion (L-PBF).

El propósito de este piloto es optimizar las metodologías de diseño y fabricación de insertos de molde para la optimización del enfriamiento mediante el empleo de modelos avanzados que incluyen optimización topológica, simulación térmica, fabricación híbrida y pruebas no destructivas. También se abordará el análisis de costes. Todos los resultados se compararán con las soluciones de fabricación convencionales.

Selección de material

El material seleccionado para el piloto es un acero para herramientas comercial en forma de polvo - Böhler W360 - como alternativa al acero estándar H13. Esto se debe a que la W360 está diseñada para máquinas sin cama caliente, como es el caso de la Trumpf TruPrint 1000 que se utilizó para fabricar el inserto.

Estudio de viabilidad

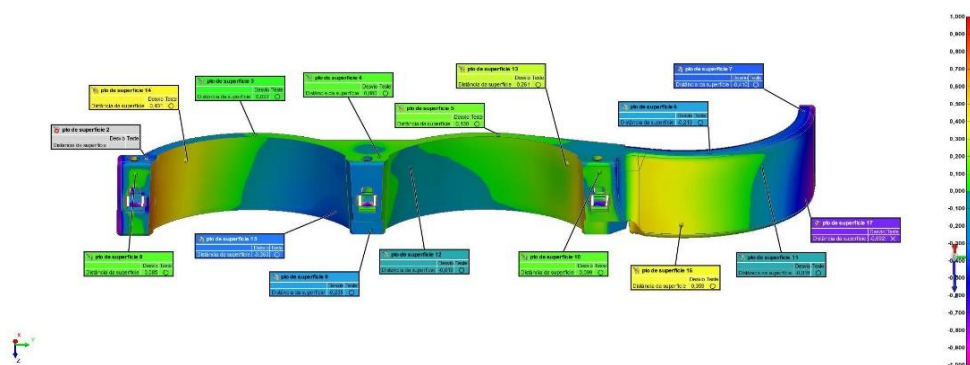
El inserto fue fabricado por L-PBF en su forma completa. La operación de acabado involucró el fresado de la base y el mecanizado por electroerosión (EDM) para la región activa del inserto. Según Moldetipo, estas operaciones de acabado son similares a las necesarias para obtener la plaquita convencional (sin canales de refrigeración). La diferencia adicional fue la presencia de entradas de refrigeración para la conexión al circuito de refrigeración por agua. No fue posible determinar el funcionamiento a largo plazo del inserto, y no se deben ignorar las inquietudes sobre la integridad estructural derivadas de las grietas detectadas en el análisis. Por lo tanto, sería relevante realizar un tratamiento térmico al inserto, después de la fabricación con L-PBF y antes de las operaciones de acabado, para producir una pieza más resistente y quizás evitar el agrietamiento.

Los insertos convencionales y los producidos por L-PBF se ensamblaron en el molde y se realizaron pruebas de inyección. A modo de comparación, se consideraron dos tiempos de enfriamiento: 10s y 16s. Las piezas producidas se separaron en 4 grupos:

- C10: inserto convencional, tiempo de enfriamiento de 10 s
- C16 - inserto convencional, tiempo de enfriamiento de 16 s;
- S10 - Inserto L-PBF, tiempo de enfriamiento de 10 s;
- S16 - Inserto L-PBF, tiempo de enfriamiento de 16 s.

Para la evaluación completa de las desviaciones del modelo CAD, se analizaron 5 especímenes de cada uno de esos tipos de grupos.

Las Figuras 11 y 12 muestran un ejemplo del análisis dimensional (desviación de la geometría CAD) de 2 muestras de piezas inyectadas: fabricadas con el inserto L-PBF y fabricadas con el inserto convencional. Ambas partes tuvieron un tiempo de enfriamiento de 16s (C16 y S16).



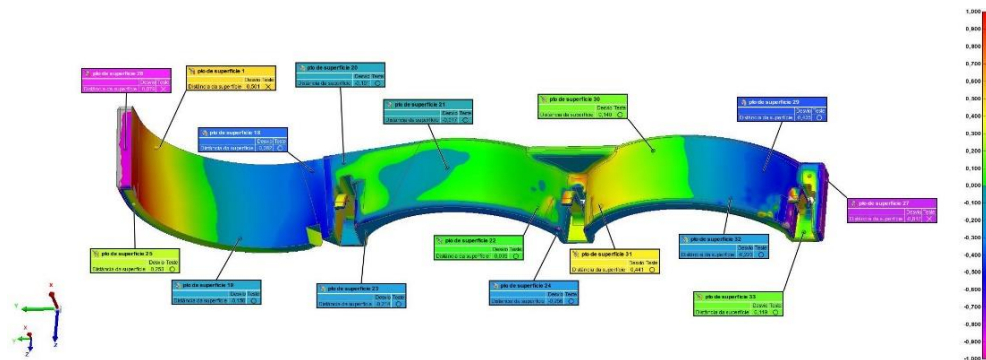


Figura 11. Análisis dimensional de las piezas inyectadas con el inserto L-PBF y enfriadas durante 16s.

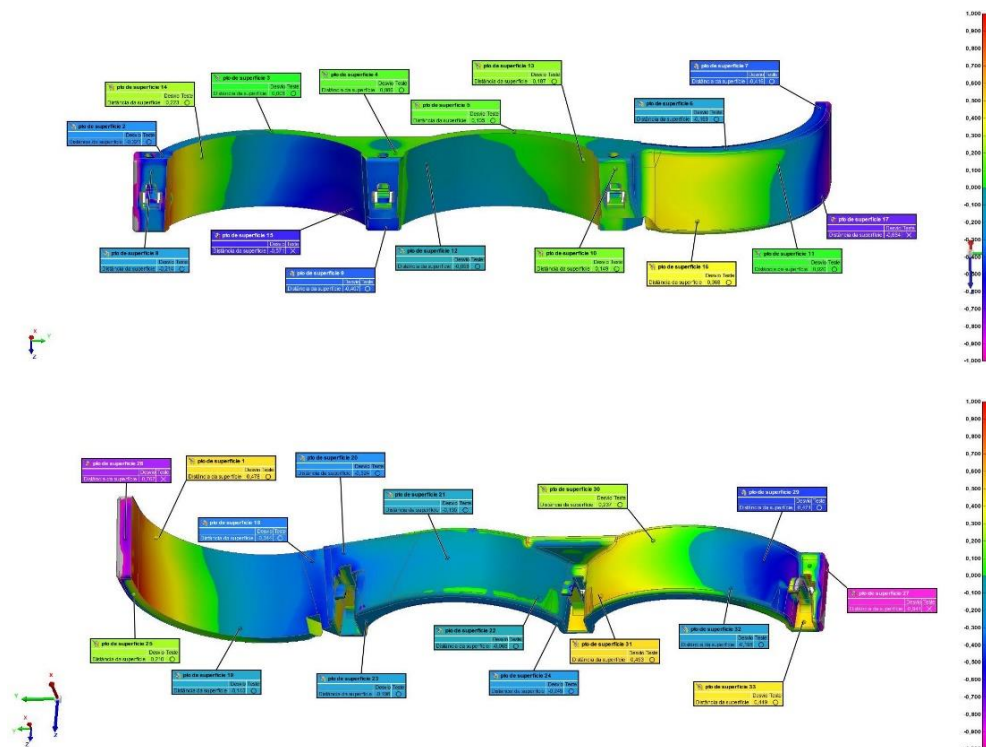


Figura 12. Análisis dimensional de las piezas inyectadas con el inserto convencional y enfriadas durante 16s.

Se midieron 32 puntos en cada parte. En la Figura 13 se presenta un análisis detallado de las desviaciones a lo largo de esos puntos. En la Figura 14 se muestra el resumen de la desviación promedio y el promedio de las desviaciones estándar. Es posible observar que la cantidad macroscópica y la tendencia de la deformación no es muy diferente entre todos los especímenes. Sin embargo, es posible detectar un grado menor de desviación de CAD en las muestras de L-PBF (S10 y S16), aunque la desviación estándar promedio es significativa.

Desviación con respecto al CAD

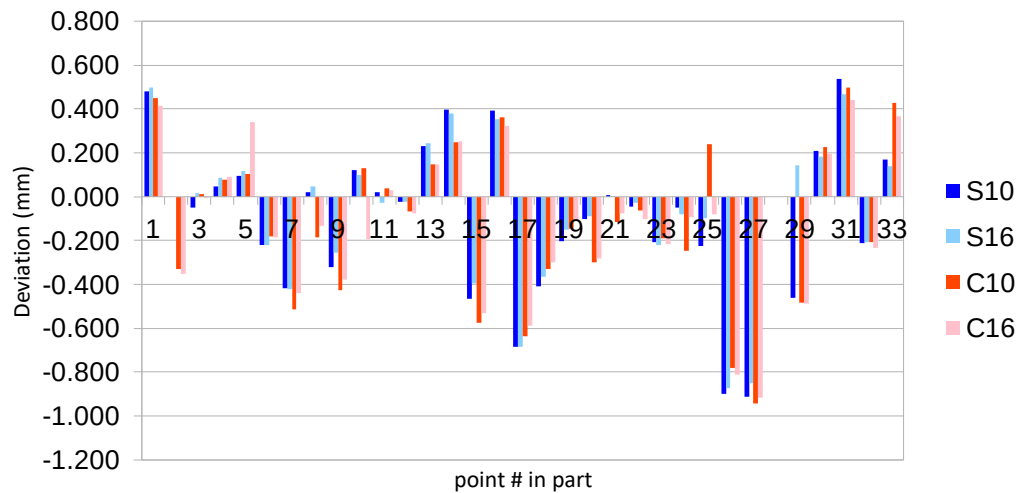


Figura 13. Desviación media en cada punto de los componentes.

Dimensional analysis - deviations from CAD average of absolute deviation measurements; standard deviation of measurements

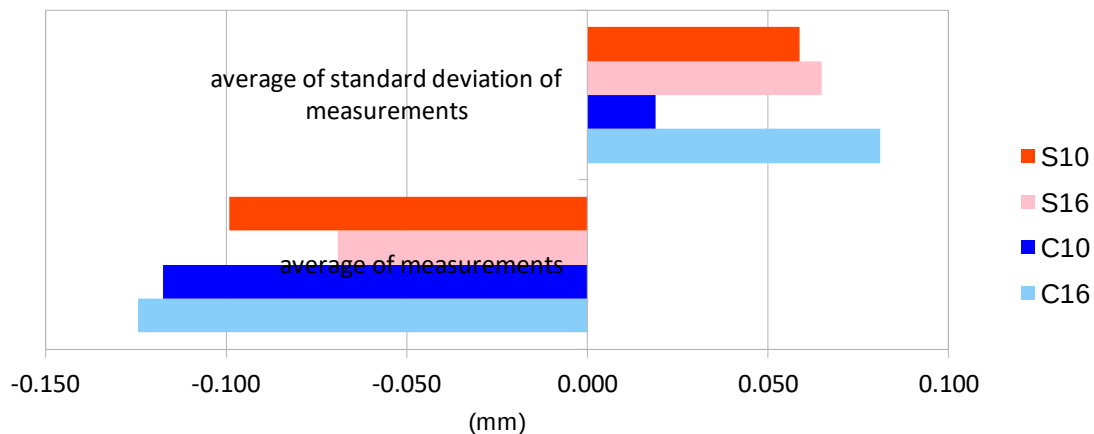


Figura 14. Desviación media y estándar en las medidas de todos los componentes.

Para el estudio de viabilidad, los costes internos de modelado y producción del inserto L-PBF se compararon con los mismos costes para la producción del inserto convencional. La tabla a continuación resume los costes para ambos insertos. El nivel de detalle de cada uno es diferente, ya que el L-PBF se fabricó internamente en CDRSP y el inserto convencional se fabricó en

Moldetipo y, por lo tanto, hay una limitación de información debido a problemas de confidencialidad.

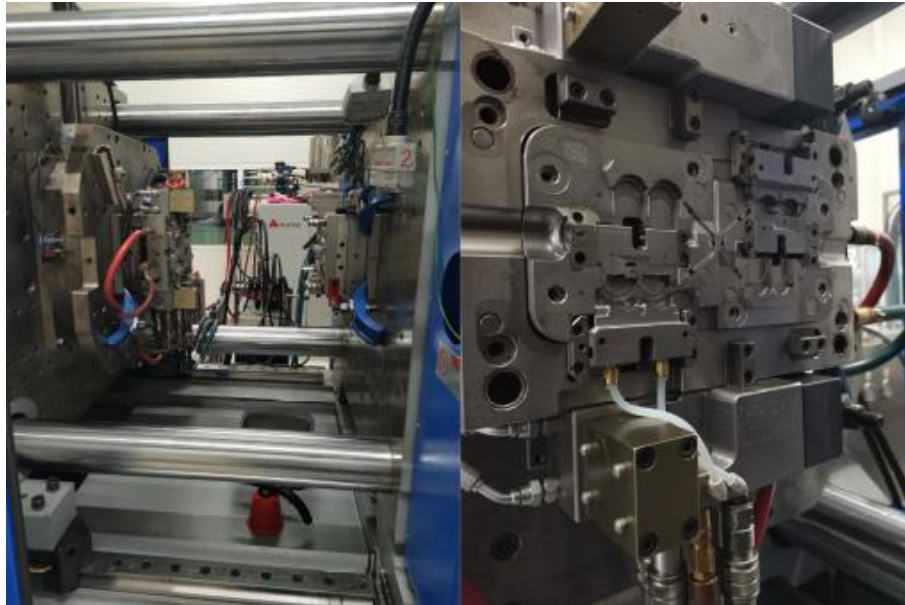


Figura 15. (izquierda) máquina de moldeo por inyección con molde ensamblado; (derecha) detalle de la cavidad del molde que muestra el inserto L-PBF con entradas de enfriamiento.

	Costes de fabricación (€)	Costes de acabado (€)
Inserto L-PBF	Materiales y equipo Polvo + tiempo de impresión + gas + electricidad + depreciación de equipo + tasa de éxito– 77€ Tiempo (considerando ratio de tiempo 50€) Modelado y simulaciones + Preparación + Post procesado – 925€ Total: 1002€	Fresado + EDM + ajustes - 100
Inserto convencional	Fabricación - 250€	Fresado + EDM + ajustes - 100
Diferencia de costes	752 €	0

Se puede observar que existe una diferencia de coste de 752€, que se utilizará como input para el estudio de viabilidad.

El estudio de viabilidad se realizó con los siguientes parámetros:

- hándicap de coste inicial - -752€
- diferencia de tiempo del ciclo de inyección (menos en el inserto L-PBF) – 6 s
- coste por hora de la máquina de moldeo por inyección, incluido el operador y los costes fijos restantes: 40 €

Calculando los costes de producción para tamaños de lote variables de 1000 a 100000 componentes, es posible determinar el punto de equilibrio del coste inicial del inserto L-PBF – Figura 16. Como se puede observar, un tamaño de lote de aproximadamente 12000 piezas es suficiente para recuperar la diferencia de costes del inserto L-PBF. Este resultado es muy interesante, ya que el tamaño del lote es bastante pequeño en el contexto de producción de moldeo por inyección.

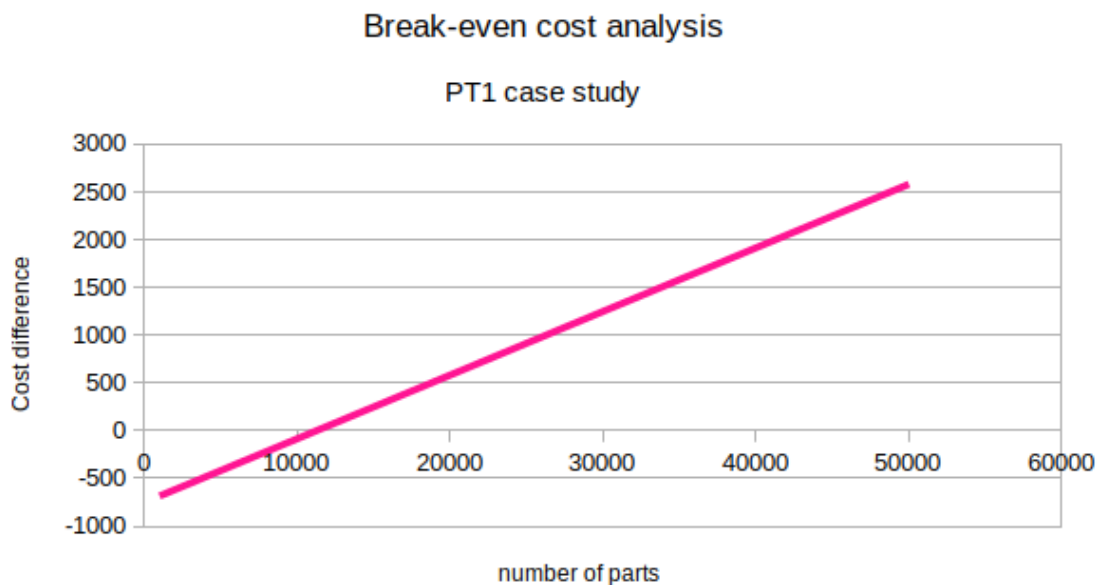


Figura 16. Análisis de coste de equilibrio para el inserto L-PBF en comparación con el inserto convencional

2.3. Piloto SP1- MEUPE/INESPASA

Antecedentes

El piloto analizado en este apartado es un sistema de taladrado manual desarrollado por INESPASA para el sector aeronáutico (Figura 17.a). Este sistema debe ser compacto (sin espacio interior además de la electrónica y los motores) y ligero. La carcasa se obtuvo originalmente mecanizando un bloque de Aluminio (material de baja densidad y económico). Esta solución compacta tenía algunas dificultades asociadas con la disipación de calor. Durante el funcionamiento, el calor generado por los motores produce un aumento de temperatura donde el operador necesita poner su mano (Figura 17.b), hasta más de 60 grados centígrados.

Dependiendo de las revoluciones por minuto, los motores podrían incluso detenerse debido a la alta temperatura de operación.

El tiempo de entrega de todo el sistema es de 3-4 semanas y se podría fabricar por menos de 1.000€. Sin embargo, la pieza objeto de estudio es la carcasa donde se encuentran los motores (izquierda, Figura 17.b), y este componente se podría fabricar en 1 día (8h) con un coste aproximado de 500€.

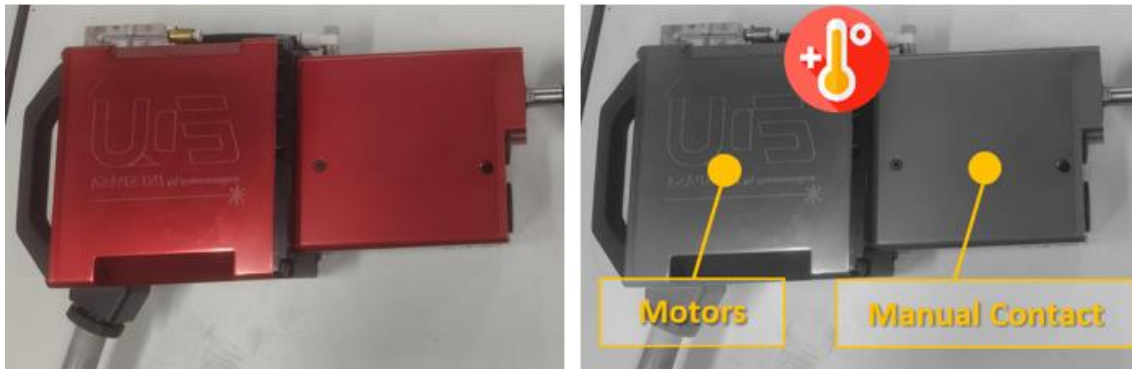


Figura 17. Imagen de (a) carcasa original y (b) zonas con mala disipación térmica

Objetivos del piloto

Los principales objetivos de este piloto se enumeran a continuación:

- Fabricación de toda la carcasa de aluminio con PBFL
- Aumentar el rendimiento térmico añadiendo disipación de calor activa (canales de refrigeración dentro del componente) o pasiva (estructura de celosía o giroide).
- Comparar las propiedades térmicas entre la pieza original mecanizada con los resultados obtenidos por PBFL
- Disminuir la necesidad de herramientas para el mecanizado
- Buscar optimizar la tecnología ya existente agregando funcionalidad a una herramienta.

Para cumplir con estos objetivos, la solución propuesta FAM fue fabricar la carcasa donde se ubican los motores, incluyendo canales internos para refrigerar la carcasa y los motores (Figura 18). Dado que el sistema ya contaba con un subsistema interno neumático, se puede utilizar el mismo flujo de aire para mejorar el rendimiento térmico.

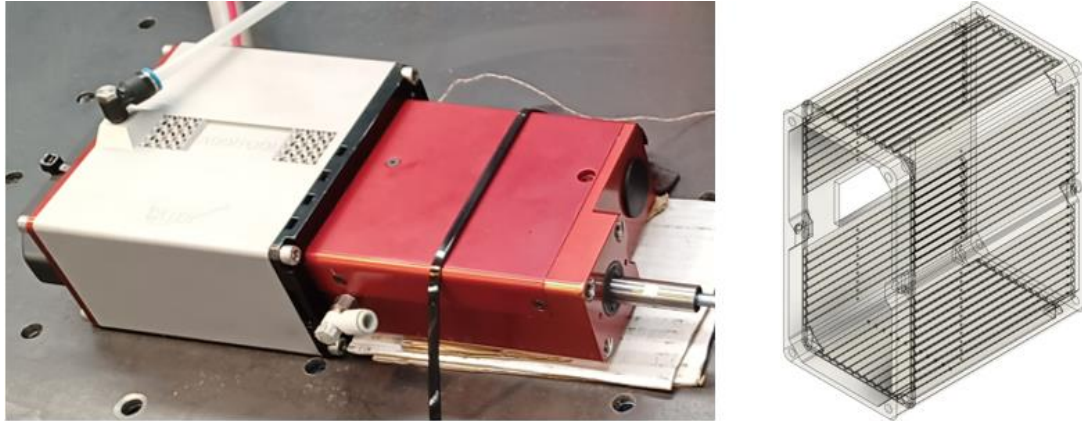


Figura 18. Imagen de (a) carcasa FAM y (b) vista esquemática de los canales internos

Selección de material

Durante el desarrollo de este piloto se han estudiado dos materiales diferentes: AlSi10Mg y Scalmalloy®.

Como el objetivo principal era caracterizar las propiedades eléctricas y térmicas de ambos materiales una vez fundidos (sólidos), en este piloto no se ha considerado la caracterización de las materias primas (polvo), la información entregada por el proveedor del polvo se consideró como criterio inicial. El polvo Scalmalloy® fue suministrado por TOYAL y AlSi10Mg por LPW.

Los resultados y conclusiones de la selección del material se presentan en D2.1 Informe de Material para FAM. Como conclusión principal, el Scalmalloy® ha sido seleccionado como mejor aproximación para este piloto ya que tiene mejores propiedades mecánicas, pero también una conductividad térmica más baja.

Estudio de viabilidad

Para estudiar la viabilidad económica de la solución propuesta, el mejor enfoque se ha encontrado mediante la fabricación de 4 carcasas en una sola vez, usando corte por electroerosión para extraer el componente, pero también para obtener las interfaces. Los taladros y roscas se obtuvieron manualmente (Figura 19).

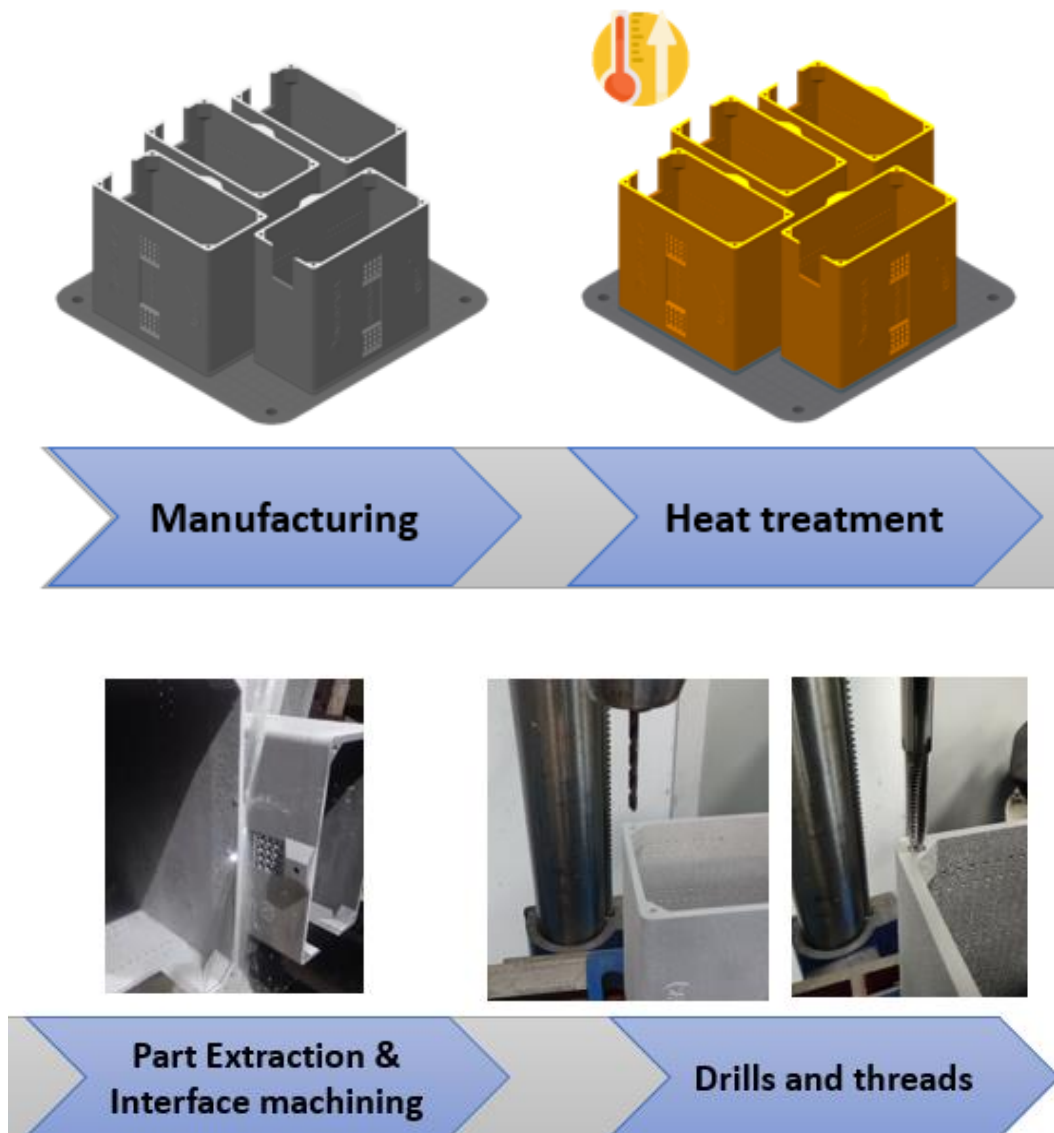


Figura 19. Hoja de ruta para fabricar la carcasa FAM

Teniendo en cuenta el proceso de fabricación que se presenta en la Figura 19, se podrían fabricar, tratar térmicamente, cortar por hilo, taladrar y roscar cuatro carcasas en menos de 30 h (7,5 h/caja). El coste de cada carcasa es de 750€ aproximadamente.

Comparando la carcasa convencional y la obtenida por AM, se puede observar que ambos tienen un tiempo de entrega similar, pero en cuanto a coste, la carcasa obtenida por MAM es 250€ más cara que la convencional. Se esperaba este resultado ya que el coste de mecanizar una geometría simple de aluminio es difícil de mejorar.

Por otro lado, en cuanto a la viabilidad tecnológica, los resultados presentados en el entregable D 2.2.1 Informe de resultados de fabricación, muestran cómo el rediseño de la carcasa con canales internos ha mejorado drásticamente el comportamiento térmico de todo el sistema, alcanzando una diferencia de 31 °C (55°C → 24°C) en la superficie del caso analizado.

La siguiente figura muestra el análisis termográfico realizado en la carcasa convencional (Figura 20.a) y rediseñada (Figura 20.b), después de operar durante 50 minutos. Se puede observar

como la temperatura máxima que alcanza la carcasa AM es de 24°C, mientras que la carcasa convencional alcanza los 55°C.

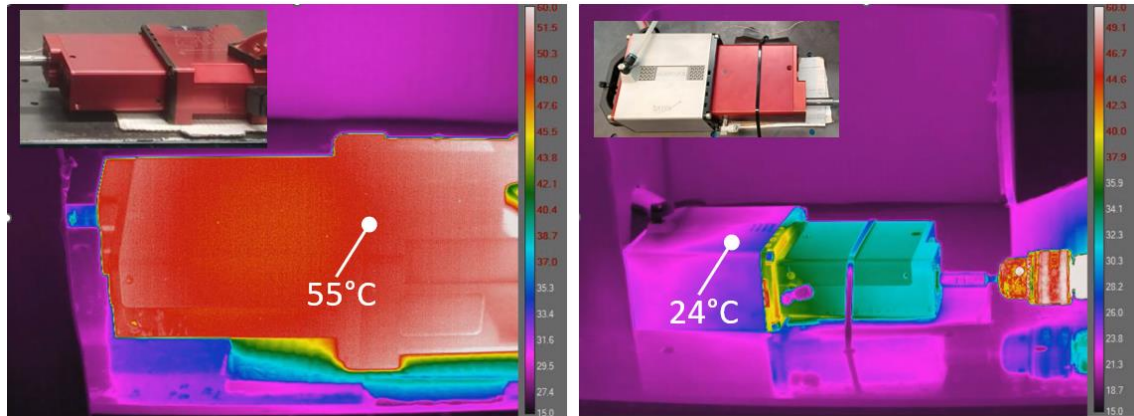


Figura 20. Imágenes termográficas de las carcasas (a) convencional y (b) AM.

El demostrador ha sido ensayado con la empresa INESPASA y, además del sobrecoste de 250€ por carcasa, la solución propuesta durante este proyecto ha satisfecho claramente al usuario final, ya que el sistema es funcional, con un comportamiento térmico que hace que la herramienta sea cómoda, más ligera (37% de reducción de peso) y operativa durante largos períodos.

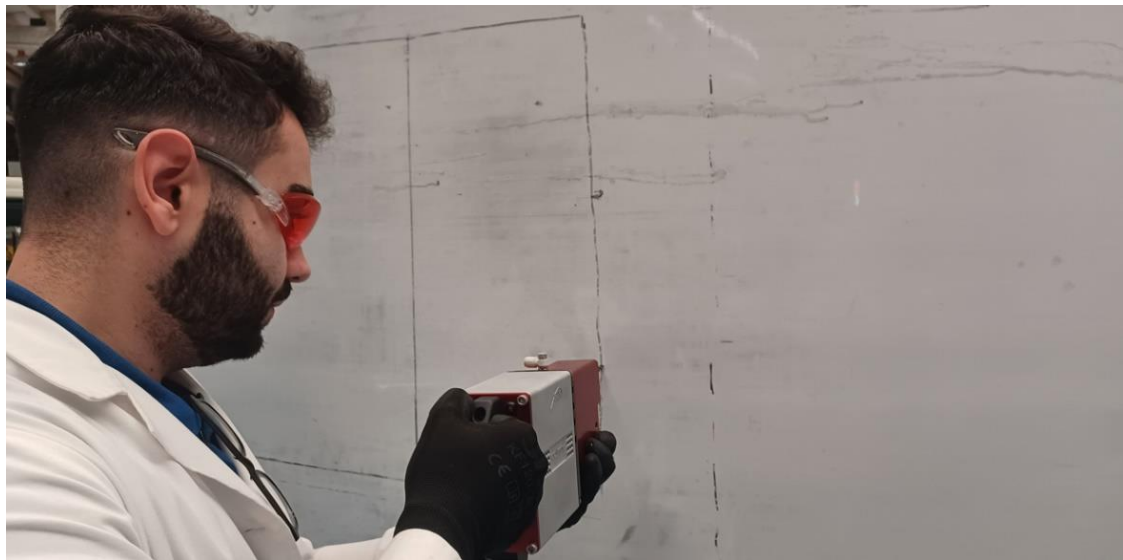


Figura 21. Imagen de los ensayos finales realizados para validar la herramienta

2.4. Piloto FR2-SOMOCAP

Antecedentes

La pieza piloto que ofrece SOMOCAP es un núcleo de moldeo por inyección de plástico (Polietileno PE).

Este utillaje, que se enmarca en la industria agrícola, es una pieza mecanizada originalmente a partir de un bloque de acero 40CMD8 (C45), con un orificio de 10 mm en el interior para enfriar la pieza desde su interior.

Sin embargo, este orificio recto para el enfriamiento no es suficiente y el enfriamiento no es eficaz: durante la fase de enfriamiento, la parte de polímero presenta una ovalización y no es del todo circular.

Datos originales:

- Tolerancia final: $\pm 0.02\text{mm}$ pulido desmoldado
- Precio original: 5000€ (incluyendo electroerosión para la parte superior de la pieza)
- Plazo de entrega original: 2 semanas
- Presión de inyección: 800 bares

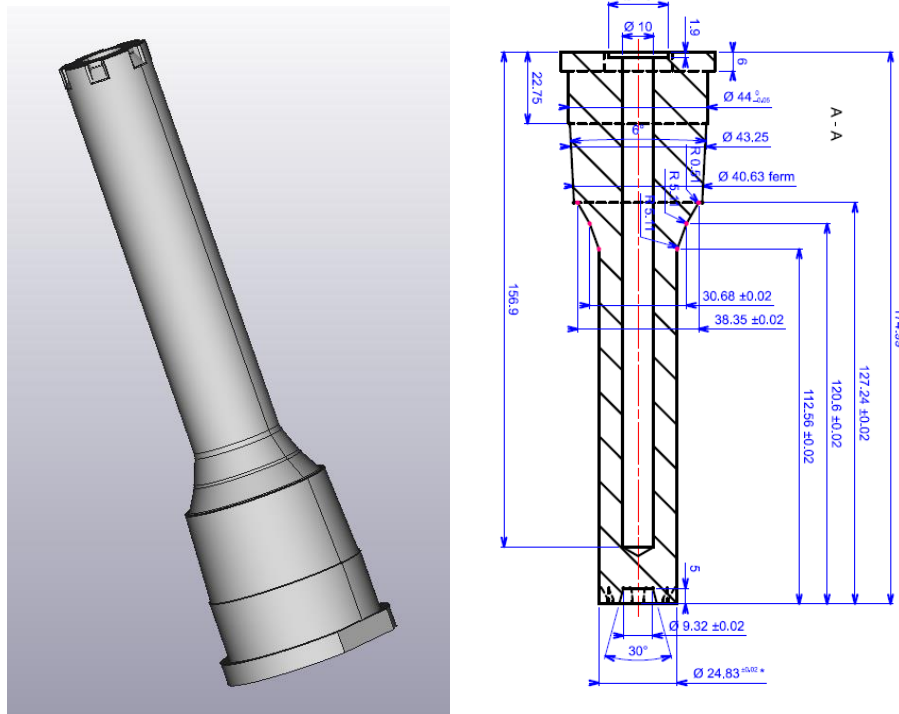


Figura 22. Piloto propuesto por SOMOCAP

La regulación térmica se hace con un separador, como se muestra en la Figura 23.

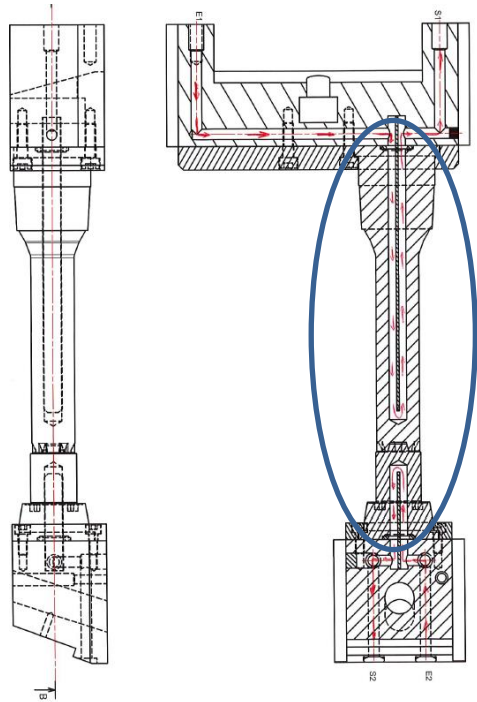


Figura 23. Principios de regulación Térmica

Objetivos del piloto

Los objetivos de este piloto son varios:

- Fabricar esta pieza con 2 metales FFF/FDM diferentes (fabricación de filamentos fundidos/modelado por deposición) y sinterizado (con y sin Hot Isostatic Pressing-HIP).
- Aumentar el rendimiento de esta herramienta agregando enfriamiento conformado.
- Reducir el tiempo de entrega y el precio.
- Hacer accesible la Fabricación Aditiva Metálica a todos / Tecnología basada en procesos MIM (Metal Injection Moulding).

Las tecnologías de fabricación aditivas metálicas, como DED Wire Laser o Arc, L-PBF, DED Powder Laser, etc., son muy costosas y estos costes generalmente son prohibitivos para una PYME.

Desarrollar un nuevo proceso, basado en una tecnología conocida (proceso FDM) y tratar de tener una pieza metálica más económica es uno de los grandes objetivos de este piloto.

La referencia en el mercado para hacer este tipo de aplicación es la Markforged Metal X, disponible en el consorcio ADDITool. Sin embargo, esta máquina es un sistema cerrado y con “tecnología propia”.

Realizar el mismo trabajo con una máquina clásica y abierta, disponible directamente en el mercado, podría ser muy interesante.

Los socios de ADDITOOL han realizado un rediseño de la herramienta propuesta por SOMOCAP para aumentar el rendimiento de refrigeración. El piloto a fabricar se muestra en la Figura 24.

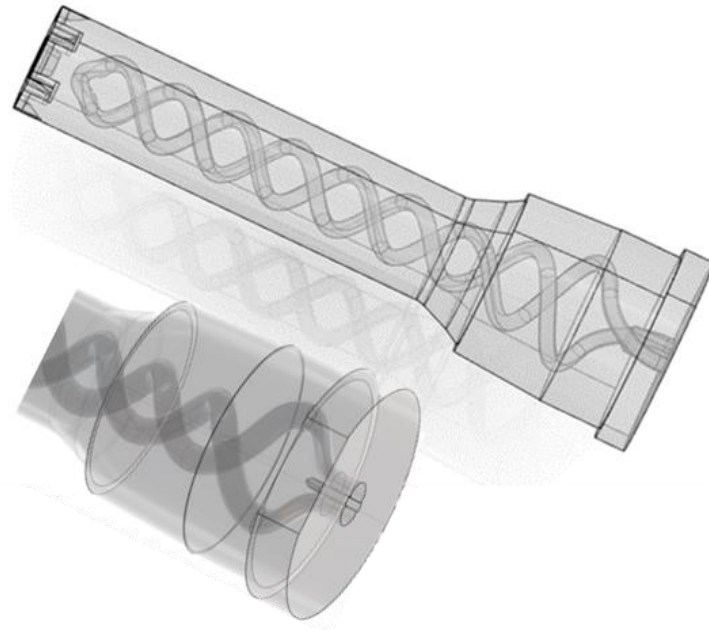


Figura 24. Piloto de SOMOCAP con canales de refrigeración

Para cumplir con estos objetivos, el método que se utilizó fue:

- Caracterizar el material y la pieza fabricada para cada tecnología: Materia prima y material fabricado.
- Fabricación de la pieza mediante diferentes tecnologías: Markforged Metal X + accesorios y Lynxter S600D + accesorios.
- Tratamiento térmico: Desaglomerado / Sinterizado.
- Escaneado/Tomografía 3D.
- Mecanizado de las piezas.
- Probar el componente en producción + entregable de viabilidad.

Selección del material

Al inicio de ADDITOOL, estos son los materiales disponibles en el mercado:

- BASF: Ultrafuse 316L y Ultrafuse 17-4PH – Desaglomerado catalítico
- Nanoé: Zetamix 316L y Zetamix H13 – Desaglomerado térmico

- Nanovia: Mt 316L – Desaglomerado térmico
- Markforged: 17-4PH, cobre, acero para herramientas Inconel 625, H13, A2 y D2. Todos los materiales son específicos para la máquina y los accesorios Metal X – Desaglomerado con Opteon SF-79

De acuerdo con la especificación suministrada por SOMOCAP, solo el 17-4PH y el H13 cumplen los requisitos (dureza y condición de alta presión), ver Figura 25.

Además, el H13 y el 17-4PH están disponibles tanto para Markforged Metal X como para un sistema abierto.

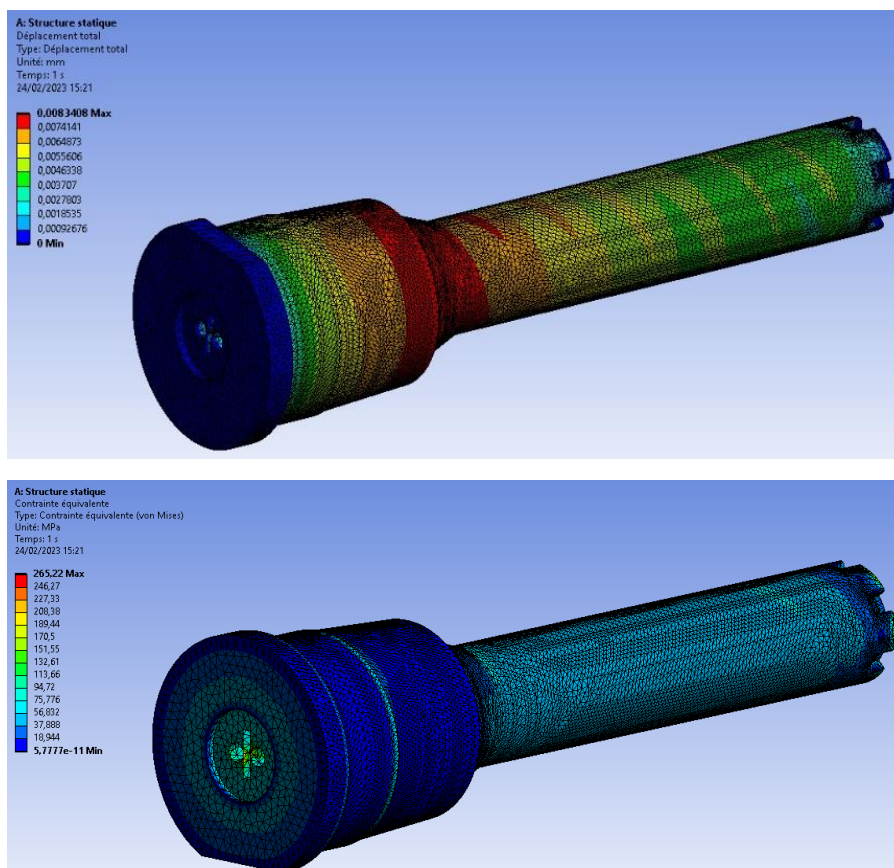


Figura 25. Simulación y dimensionamiento según el material

Estudio de viabilidad

La fabricación de la pieza SOMOCAP se ha realizado con los siguientes medios:

- Markforged Metal X + accesorios
- LYNXTER S600D + accesorios
- Tecnología RAPIDIA con base de agua-pasta cargada de metal.

Técnicamente, el filamento NANOE ha dado malos resultados; no con la impresión (Lynxter S600D) sino con la fase de desaglomerado y sinterizado si se usa como se recomienda. El proceso de desaglomerado y sinterizado ha sido optimizado por el consorcio para este filamento, obteniendo una buena geometría externa y niveles de C controlados. El ciclo HIP final permitió cerrar la mayor parte de la porosidad, pero es necesario tener un primer desaglomerado químico para abrir los poros y facilitar el desaglomerado térmico.

El fabricante recomienda 91h de proceso de desaglomerado/sinterizado que no son aceptables para una PYME y se han reducido a menos de 20h, siendo un resultado muy interesante.

Sin embargo, se detuvo el desarrollo con este material a causa de los resultados en las propiedades metalúrgicas y mecánicas que fueron relativamente bajas. Este filamento puede funcionar para piezas pequeñas, pero actualmente no es viable para piezas grandes y altas.

Markforged Metal X, referencia actual en el mercado, da resultados bastante buenos pero un poco por debajo de la especificación anunciada, ver el Informe del Entregable D2.1.1 sobre material FAM. Además, Markforged H13 ya era casi denso después de la sinterización y con HIP se cerraron todos los poros restantes. Sin embargo, todavía existen restricciones dimensionales en Markforged para fabricar y sinterizar grandes componentes.



Figura 26. Fabricación con Markforged Metal X

La tecnología RAPIDIA parece prometedora en la medida en que no utiliza un filamento cargado con un 50 % de polvo metálico, sino una pasta acuosa con una carga de sólidos cercana al 60 % y un aglutinante polimérico muy bajo (<1 %).

El uso de una materia prima con cantidades muy pequeñas de polímero permite que RAPIDIA simplifique el desaglomerado y produzca menos emisiones. El sistema de impresión 3D de metal Rapidia es un sistema capaz de imprimir piezas con estructuras internas complejas, utilizando tecnología patentada de soporte evaporativo. La pasta en base de agua permite crear ensamblajes complejos con facilidad mediante la unión con agua de piezas impresas en 3D o mediante la fusión de piezas impresas en 3D con piezas mecanizadas. Este sistema de impresión 3D de metal permite que las piezas se sintericen directamente de la impresora, sin un paso de desaglomerado por separado. Las piezas impresas con procesos convencionales de tres etapas deben prepararse para la sinterización disolviendo el aglutinante polimérico. Este paso puede demorar varios días y requiere tratar el componente impreso con un solvente químico. El proceso Rapidia elimina la necesidad de una etapa separada de desaglomerado al reemplazar la mayoría de los polímeros aglutinantes con agua. El agua se evapora durante la impresión,

dejando una parte verde con menos del 1% de aglutinantes. Las piezas ecológicas fabricadas con el sistema de Rapidia pueden ir directamente a la sinterización, con ciclos de sinterización cortos, un proceso seguro que puede entregar las piezas más rápidamente.

Tanto Markforged como RAPIDIA permiten una impresión con una amplia gama de metales, con opciones de excelente resistencia, capacidades de alta temperatura y buena resistencia a la corrosión.

Toda la cadena de fabricación de las marcas comerciales Markforged y Rapidia está optimizada lo que hace que estas tecnologías sean muy competitivas (producción nocturna por ejemplo, sin necesidad de tener un operario delante de la máquina, etc.).



Figura 27. Tecnología RAPIDIA

Algunos costes según la materia prima:

Material	Precio/kg
Nanovia Mt 316	250€/kg
Nanoe Zetamix 316L	500€/kg
Nanoe Zetamix H13	500€/kg
BASF Ultrafuse 17-4PH	100€/kg
BASF Ultrafuse 316L	130€/kg
Markforged H13	245€/200cm ³
Markforged 17-4PH	135€/200cm ³
RAPIDIA 17-4PH	376€/L --> 75.2€/kg

Descripción	Precio	Tiempos
Programación	56 € (900 €/día)	30min
Fabricación	150 € (150 €/día)	20h
Material – 1.8kg	156€ para 17-4PH Markforged 283€ para H13 Markforged 87€ para 17-4PH Rapidia	/
Debinding y sinterizado	900 €	Días +1
Mecanizado	865 €	1 semana de subcontratación
Total	2 127 € Markforged 17-4PH 2 254 € Markforged H13 2058 € RAPIDIA 17-4PH	5 días

El coste, incluso si es menos importante que el original, no es un indicador en este caso porque no es posible realizar la comparación con la pieza original.

De hecho, este proceso permite fabricar la pieza con un valor añadido real (el canal de enfriamiento conformado solo es posible con tecnologías FAM) que no era posible con tecnologías convencionales.

2.5. Piloto PT2- VIDIRIMOLDE

Antecedentes

La aplicación de canales de enfriamiento conformados, diseñados para coincidir estrechamente con la geometría de la pieza para mejorar su enfriamiento, se ha aplicado a moldes de inyección de plástico, troqueles de estampado y otros utillajes, para permitir una reducción en el tiempo y/o lograr ciclos térmicos específicos, como temple.

Sin embargo, este no ha sido el caso de los moldes para vidrio. Estos tienen aspectos que hacen que valga la pena estudiar la aplicación de canales de enfriamiento conformados. Estos son: las temperaturas de trabajo -alrededor de 600°C-, el medio de refrigeración -aire comprimido-, y el tiempo de ciclo -normalmente unos segundos.

El enfriamiento convencional de los moldes de vidrio se realiza mediante la inyección de aire comprimido a través de un conjunto de orificios perforados rectos que se extienden a lo largo de la dirección vertical del molde. Esto se llama “vertiflow” – Figura 28. La ventaja de este enfoque es la relativa simplicidad para lograr estos orificios. La desventaja es que la temperatura

alrededor del vidrio no es uniforme en toda la superficie del molde. Esto significa que hay una mayor probabilidad de defectos en la pieza final.

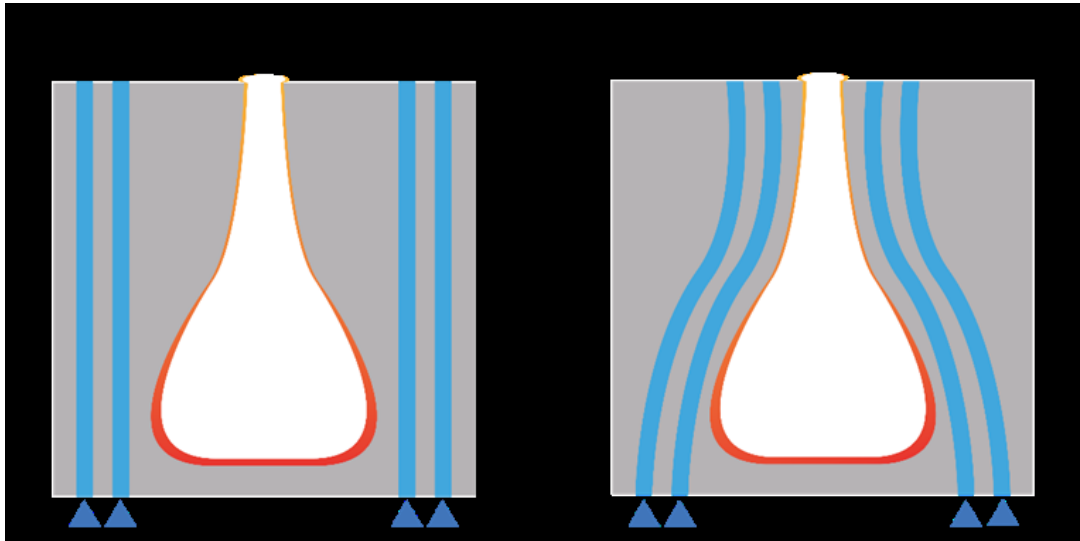


Figura 28. Los dos tipos de enfriamiento para moldes de vidrio. Izquierda - el método de enfriamiento convencional; derecha - el método de enfriamiento propuesto.

Los moldes para vidrio también presentan problemas de desgaste en las superficies de moldeo, debido a las altas temperaturas de servicio. Esto generalmente se mitiga depositando una capa de un material más duro, como una aleación a base de níquel, en los bordes internos del molde. Este proceso generalmente se realiza por deposición de plasma, TIG o MIG, como un proceso adicional dentro de la línea de producción.

La pieza propuesta es un molde para una pequeña botella de vidrio – Figura 29. Esta botella tiene una geometría inusual, lo que plantea un desafío adicional para el sistema de enfriamiento convencional. Sin embargo, dada su pequeña dimensión, será más apropiado para producir por fabricación aditiva metálica.

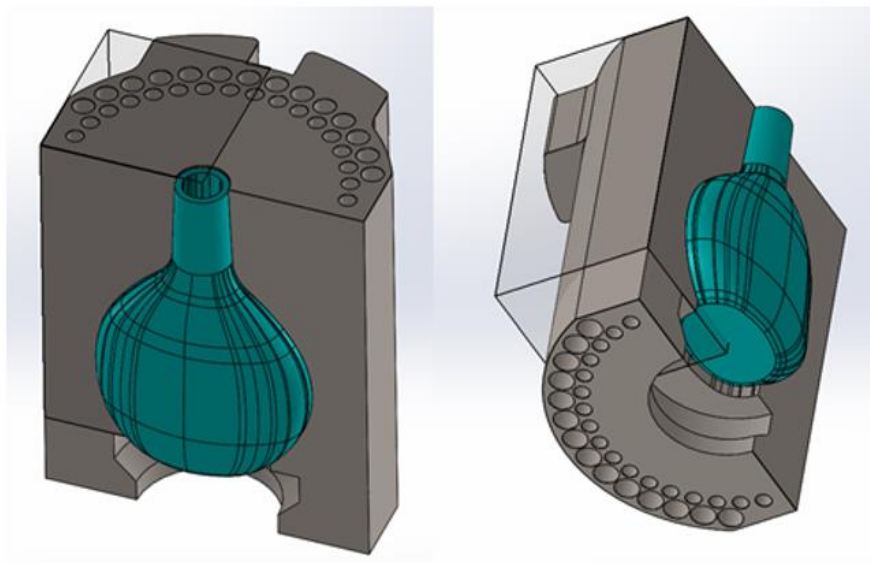


Figura 29. Molde para una botella de vidrio

Objetivos del piloto

El objetivo del piloto es evaluar la viabilidad de aplicar un sistema de enfriamiento conformado al molde, combinándolo con una estructura reticular interna para reducir el peso y con una superficie de moldeo mejorada. Los dos primeros objetivos se logran utilizando la fabricación de L-PBF, mientras que el último se logra depositando capas de aleación de níquel mediante DED Laser en polvo.

Selección de material

El material seleccionado para el piloto es un acero inoxidable comercial en forma de polvo: EOS SS CX. Esto se debe a que la pieza será fabricada en una empresa colaboradora, por su tamaño, y este es el polvo (SS) que tenían disponible en el equipo.

Estudio de viabilidad

El molde fue fabricado primero por L-PBF, dejando una superficie compensada para la posterior deposición por parte de L-DED. La operación de acabado implicó el fresado de la superficie de moldeo.

No fue posible probar el molde en condiciones reales de trabajo. Esto se debe a que requeriría detener una línea de producción y reemplazar un juego de moldes en una estación (generalmente compuesta por alrededor de 12 moldes). Por lo tanto, las indicaciones sobre el rendimiento de enfriamiento se extrajeron de las pruebas del modelo. En estas, se probaron un conjunto de especímenes para varias opciones de sistemas de enfriamiento utilizando aire comprimido, después de ser calentados a las temperaturas típicas de servicio. Estas opciones incluían canales con sección circular, sección elíptica, combinados con secciones no uniformes a lo largo de la probeta, así como la combinación con estructuras reticulares y aletas internas - Figura 30.

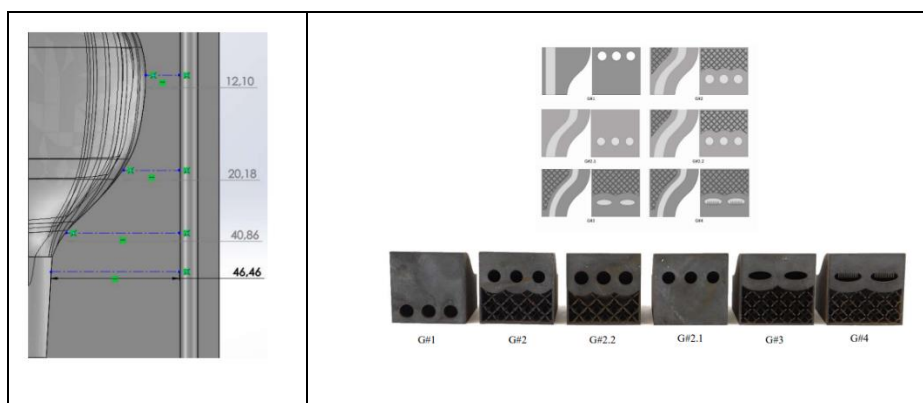


Figura 30. Geometría de los especímenes para el modelado de enfriamiento.

Los resultados indican que todas las soluciones de enfriamiento conformado logran una velocidad de enfriamiento más rápida en comparación con la solución de enfriamiento convencional. Para una temperatura inicial de 650 °C, la mejor solución de enfriamiento conformada se obtuvo para G#3 (canales elípticos combinados con una estructura de celosía), reduciendo el tiempo de enfriamiento para alcanzar, por ejemplo, 610 °C hasta aproximadamente la mitad (de aproximadamente 9 s a 4,5 s). Figura 31.

Los costes internos de modelado y producción del molde L-PBF se compararon con los mismos costes de producción del molde convencional. La siguiente tabla resume los elementos de coste considerados para ambos moldes.

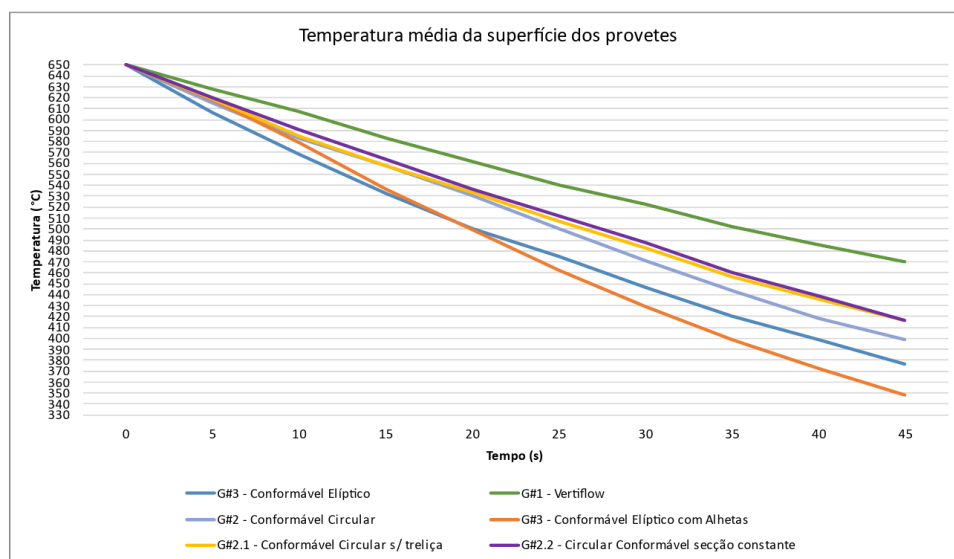


Figura 31. Comparación del rendimiento del enfriamiento convencional y varias opciones de enfriamiento conformado. Temperatura media en la superficie de las muestras (la superficie del molde)

	Costes de fabricación (€)	Costes de acabado (€)
Fabricación L-PBF	Coste Estimado:10000€	Fresado- 100€
Deposición DED	Coste Estimado: 5000€	
Molde Convencional	Coste Estimado: 280€	Fresado- 100€
Diferencia de costes	14720	0

Para el cálculo del número de piezas necesarias para compensar la diferencia de coste inicial, se consideraron los siguientes parámetros:

- coste del hándicap inicial: 14720€ - 1 molde;
- en un entorno de producción, cada máquina opera entre 8 y 12 moldes. Se considera 10 moldes por máquina para este escenario. Esto eleva la diferencia de coste inicial a 147200€.
- Para el tiempo de ciclo parcial se consideró un valor base de 3s
- Para la reducción del tiempo de ciclo (ganancia), se consideraron dos escenarios:
 - 25% de reducción (tiempo de ciclo nuevo=2,25s) y
 - Reducción del 50% (tiempo de ciclo nuevo=1,5s). Estos se basaron en las simulaciones presentadas anteriormente.
- La tarifa horaria de la máquina/operador/instalaciones se consideró 80€ (estimación)
- La tasa de producción se consideró de 15 piezas/minuto por molde, o 150 piezas/minuto para el conjunto de 10 moldes
- Se consideró que la línea de producción estaba operando en continuo (24h)

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, es posible calcular el número de piezas que compensan el hándicap de coste inicial para ambos escenarios:

- Para una reducción del 25 % en el tiempo de ciclo: 883200 piezas. Teniendo en cuenta la tasa de producción, esto significa 41 días.
- Para una reducción del 50 % en el tiempo de ciclo: 441 600 piezas. Teniendo en cuenta la tasa de producción, esto significa 21 días.

Como se puede observar, aunque el coste inicial de implantación de moldes de 10 L-PBF + DED en un entorno de producción es muy elevado, aproximadamente 15000€, el hecho de que la industria del vidrio trabaje con altas tasas de producción hace que el tiempo de amortización no sea tan alto como uno puede esperar. Aunque los costes no están completamente definidos, ya que no fue posible acceder a información más detallada, es razonable decir que existe una viabilidad potencial para el uso de tecnologías FAM en el sector de fabricación de vidrio.

3.CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este documento han mostrado una viabilidad potencial para el uso de tecnologías FAM en el sector del utillaje. Se han desarrollado 5 pilotos diferentes (FR1, PT1, SP1, FR2, PT2) para este amplio sector (molde para plástico, molde para vidrio, mecanizado, plantillas de control...) utilizando diferentes tecnologías FAM (PBF-L/M, DED Wire Laser, DED Wire Arc, DED Powder Laser y FFF).

La viabilidad tecnológica se ha demostrado probando los pilotos en condiciones reales. Todos ellos han mostrado buenos resultados cumpliendo con los requisitos (excluyendo PT2 ya que esta prueba requiere parar la línea de producción, por lo que se pondrá a prueba en próximas paradas programadas).

En cuanto al estudio de viabilidad económica, se han encontrado diferentes conclusiones en función del piloto estudiado (ver conclusiones de cada piloto). En general, el tiempo de entrega se ha reducido mediante el uso de tecnologías FAM. En cuanto al coste, se puede observar que la subcontratación de mecanizados tiene un gran impacto en el coste total. Este incremento debería disminuir si se realiza más entrenamiento para mecanizar los componentes NNS.

Interreg Sudoe ADDITOOL

European Regional Development Fund



EUROPEAN UNION

www.additool.eu