

2018

SKIN – MEJORA DE LAS PRESTACIONES DE LOS MATERIALES PROCESADOS CON FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE POST- PROCESOS

Nº Expte IMDEEA/2017/133

INFORME RESUMEN DE RESULTADOS

AIDIMME



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

ivACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL



UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

*"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunidad Valenciana 2014 - 2020"*



El principal objetivo del proyecto SKIN es la mejora de la calidad superficial de las piezas de fabricación aditiva con el fin de mejorar sus prestaciones mecánicas para piezas metálicas fabricadas en tecnologías EBM y piezas poliméricas fabricadas en tecnología SLS. De este modo, se pretende obtener vías de mejora superficial de amplio espectro que resuelvan dicha limitación y potencien todavía más el uso industrial de la fabricación aditiva.

Para la consecución de los objetivos del proyecto se estableció el siguiente plan de trabajo:

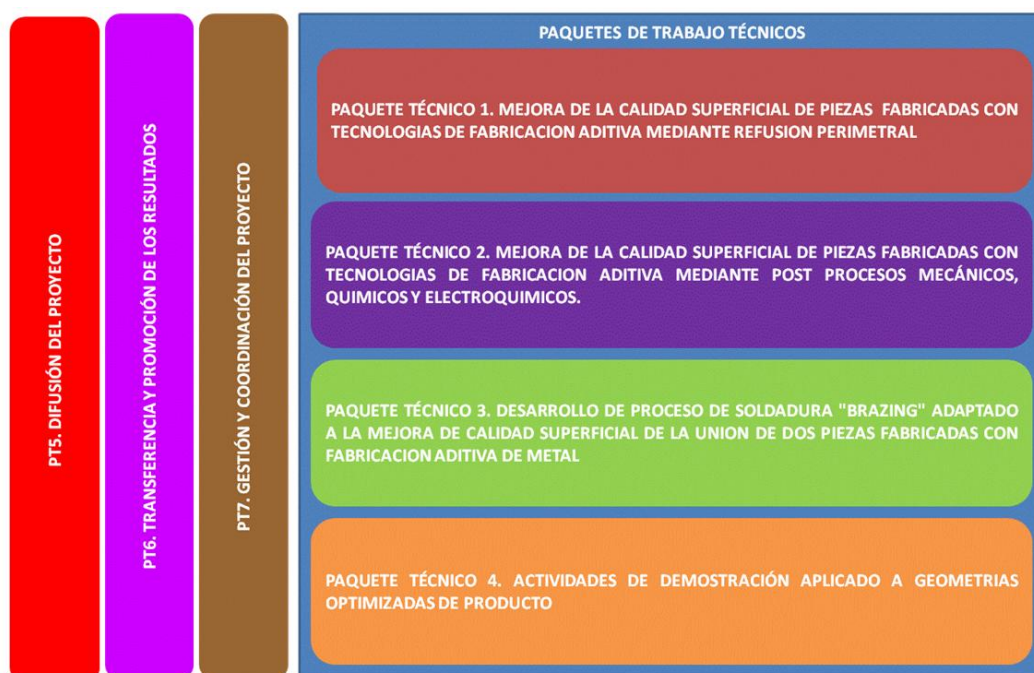


Ilustración 1. Plan de trabajo del proyecto SKIN

A continuación se describen las actividades técnicas realizadas en el proyecto.

PAQUETE DE TRABAJO 1. MEJORA DE LA CALIDAD SUPERFICIAL DE PIEZAS FABRICADAS CON TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE REFUSIÓN PERIMETRAL

En este paquete de trabajo se han realizado las siguientes actividades:

Tarea 1.1. Identificación de los parámetros del proceso de EBM y SLS que pueden influir en la mejora del acabado superficial

Se han identificado los parámetros de las tecnologías EBM y SLS que afectan directamente a la calidad de la superficie de las piezas fabricadas como consecuencia del diámetro de las partículas de polvo que se fusionan y el propio proceso de fabricación por capas. Existen muchos parámetros interrelacionados, se han seleccionado aquellos que se consideran que más afectan a la calidad superficial.

Parámetros SLM/EBM que influyen en el acabado superficial (rugosidad)

La fusión por haz de electrones (EBM) es una tecnología de fabricación aditiva (AM) que puede fabricar piezas a partir de polvo metálico. Las aplicaciones comunes para EBM son la industria aeroespacial y los dispositivos médicos. Los implantes personalizados se pueden diseñar a partir de imágenes médicas como la tomografía computarizada o las imágenes de resonancia magnética. Los implantes para reemplazo óseo hechos con imágenes CT que usan tecnología EBM se ajustarán con precisión y llevarán a cirugías más simples y mejor planificadas. Por lo general, están hechos de titanio, que tiene buenas propiedades para el crecimiento interno de hueso. Existe un consenso científico general de que superficies más rugosas son mejores para la fijación del implante. Las superficies rugosas promueven la diferenciación osteoblástica y son necesarias para la fijación ósea.

La rugosidad superficial promedio (R_a) de una pieza procesada por EBM oscila típicamente entre 20 y 50 μm . Un “tema” (*themes*) es un conjunto de parámetros que controla la fabricación durante el procesamiento. Cada material tiene “temas” individuales. El objetivo de los “themes” es lograr temperaturas que proporcionen un buen entorno de fabricación. El “*pre-heating theme*” de “precalentamiento” mantiene la capa de polvo y la pieza que ya está maciza a una temperatura elevada durante la fabricación. Esto significa que la transformación de fase debido al enfriamiento ocurre simultáneamente en toda la pieza, ya que la parte se enfría a una estructura lamelar alfa naturalmente envejecida con granos beta. El “*melt theme*” controla la fusión, y el “*wafer theme*” contiene propiedades para fabricar material de soporte.

Durante la fusión, la trayectoria del haz de electrones está controlada por el “*melt theme*” según la configuración de los parámetros. En el “*melt theme*”, los contornos se funden por separado de la zona interior. Cuando el haz se mueve, funde la capa actual en su camino, es decir, la capa superior de polvo. La “zona de fusión” es más profunda que el espesor de una capa, y el tamaño de la “zona de fusión” y el “tiempo de solidificación” afectan el tamaño de grano del material solidificado. La tecnología EBM tiene la capacidad de fabricar materiales con una microestructura fina. Las propiedades del material son comparables a las del material forjado.

Las propiedades del material son sensibles a los cambios de temperatura durante la fusión y la solidificación. Si se cambia la trayectoria, velocidad y/o energía del haz, entonces el gradiente de temperatura en un punto específico también podría cambiar, lo que podría conducir a cambios en la rugosidad superficial.

Safdar et al. (2012) investigaron algunos parámetros del proceso que afectan las superficies de piezas procesadas por EBM. Afirman que se obtiene una superficie lateral rugosa a partir de muestras gruesas y elevadas intensidades de haz (*beam current*) y que alto “*focus offset*” y una alta velocidad de escaneo crearán una superficie lateral fina. Esto sigue las conclusiones alcanzadas por Mumtaz y Hopkinson (2009). Ellos han hecho una muestra gruesa usando más energía que puede escapar a través de la pared lateral, una alta intensidad de haz (*beam current*) da como resultado una gran zona de fusión y una alta velocidad da como resultado una zona de fusión pequeña. Un bajo “*focus offset*” concentrará el haz y creará un gran gradiente de temperatura y tensiones superficiales.

En la fusión selectiva por láser (SLM), que es una tecnología AM similar y utiliza un haz láser, el R_a de las superficies superiores y las laterales se ve afectado de manera diferente por el



conjunto de parámetros de proceso. Los parámetros del proceso que crean una gran zona de fusión permitirán que la superficie superior se aplane antes de la solidificación. La reducción de la velocidad de escaneo y el aumento de la superposición de puntos (*spot overlap*) dará como resultado una gran zona de fusión; el aumento de la superposición de puntos (*spot overlap*) produce un gradiente de temperatura más uniforme en la zona de fusión y eso crea una superficie superior más lisa. Sin embargo, una gran zona de fusión causará tensiones superficiales altas que pueden salir hacia un lado y romperse, para reducir las tensiones superficiales debido a la termodinámica. Cuando esto se solidifique, la superficie lateral vertical tendrá un alto valor de Ra (Mumtaz y Hopkinson, 2009).

Parámetros SLS que influyen en el acabado superficial (rugosidad)

El proceso SLS incluye una gran cantidad de parámetros de proceso tales como potencia del láser, temperatura del lecho, espesor de capa, velocidad de escaneo, modo de escaneo, recuento de escaneo, espaciado de sombreado, longitud de sombreado y tamaño del haz (Ilustración 2). El rango de varios parámetros de proceso depende del material a procesar y las especificaciones de la máquina. Para una calidad de producto elevada, se necesita experiencia y una mejor comprensión/conocimiento de estos parámetros de proceso.

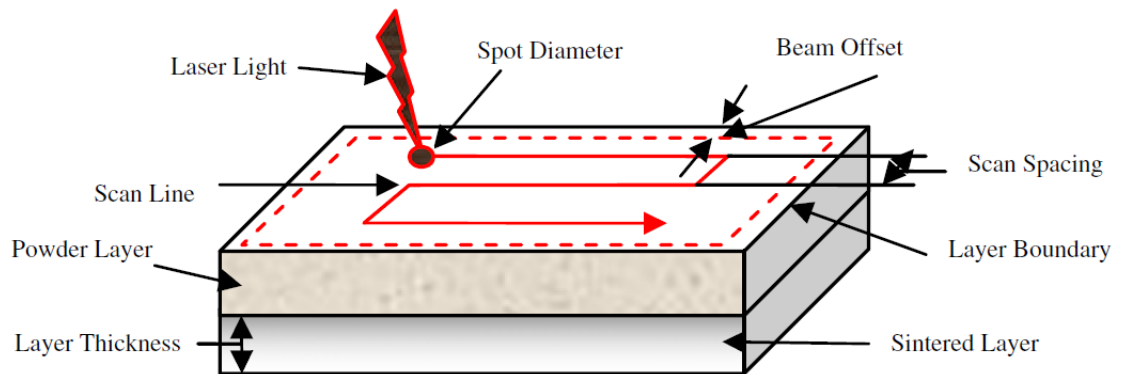


Ilustración 2. Parámetros del proceso SLS

Sachdeva, A. et. Al, evaluaron varios parámetros de proceso (potencia del láser, velocidad de escaneo, temperatura de cama, longitud de la retícula y conteo de escaneo) de la tecnología SLS y su influencia en la rugosidad superficial (RS).

La potencia del láser (*laser power*) tiene un efecto significativo y el mismo efecto en todos los parámetros de rugosidad superficial (Ra, Rz y Rq). Con el aumento en la potencia del láser desde el nivel bajo (24 W) hacia el nivel más alto (32 W), hay un aumento en la RS hasta el nivel medio (28 W). Con el aumento adicional en la potencia del láser desde el nivel medio hacia el nivel superior, la RS disminuye. La mayor potencia del láser también transfiere alta energía al material, lo que resulta en la sinterización adecuada de las partículas de polvo. La fusión adecuada y la sinterización aumentan la tendencia de las partículas de polvo a compactarse de cerca, dando como resultado un modelo compacto y disminución en la RS.

El aumento en el espaciado de escaneo (*scan spacing*) de 0.1 a 0.2 mm, hay una disminución gradual en Ra, Rz y Rq, respectivamente. Aumento adicional en el valor de espaciado de escaneo, la RS comienza a aumentar. Un valor de espaciado de escaneo bajo resulta en la superposición de zonas fundidas y la secuencia adicional de calentamiento y enfriamiento de

las líneas sinterizadas anteriores. Además, con el aumento del espaciado de escaneo también se produce un empaquetamiento deficiente de las partículas en el lecho de polvo. Por lo tanto, la tendencia de las capas a curvarse y aferrarse con los rodillos aumenta la restricción de la siguiente capa de la sinterización adecuada, lo que se traduce en un aumento de la RS.

La temperatura de la cama (*Bed temperature*) tiene un efecto significativo sobre la RS. Un aumento de la temperatura de la cama de 172 a 178 °C, primero la RS disminuye hasta el segundo nivel y luego comienza a aumentar con el aumento adicional de la temperatura de cama. En la sinterización con láser, la velocidad a la que cristaliza un material es un factor importante para determinar su propensión a curvarse y la probabilidad de soportar una buena precisión dimensional y RS. A baja temperatura de cama, el material se recristaliza lentamente, lo que es deseable.

Con un aumento de la longitud de la retícula (Hatch length) desde el nivel bajo hacia el nivel más alto en Ra, Rz y Rq disminuyen regularmente. Una baja longitud de retícula da como resultado una mayor profundidad de sinterización y la fusión de la pieza sinterizada da como resultado un pequeño incremento en la RS.

Tarea 1.2. Diseño de experimentos basado en los parámetros de proceso de EBM y SLS. Definición y fabricación de probetas

Tras la selección de los parámetros, se ha establecido un plan de experimentos para cada una de las tecnologías involucradas en el proyecto. Se han fabricado las probetas siguiendo los parámetros de proceso establecidos.

Diseño de experimentos de la tecnología EBM

En el proceso de fusión de una capa de polvo metálico en el proceso de EBM, primero la máquina dibuja o fusiona el contorno de la capa y después lo rellena mediante la opción melt.

En este estudio, se modificaron los parámetros “line offset” y “focus offset” de la “zona interior o melt” y el “focus offset” del contorno, dentro del “melt theme”, y se ha mantenido constante en el valor de “speed function”.

Por lo tanto se han variado tres parámetros fundamentalmente que son los que se describen a continuación:

El focus offset es un parámetro por el cual se controla la penetración y el ancho del área de fusión tanto en la zona interior (melt) como en el contorno.

El line offset controla la distancia existente entre las líneas de fusión.

Estos dos parámetros junto con el espesor de capa son clave en el acabado superficial de las piezas de EBM.

Se ha establecido un plan de experimentos que consta de 9 probetas en las que se han variado los parámetros anteriormente indicados tal y como se muestra en las siguientes tablas y que se consideran influyentes en el estado superficial de las piezas de titanio.



FOCUS OFFSET MELT (mAh)	LINE OFFSET MELT (mm)		
	0.1	0.12	0.14
20	p1	p2	p3
25	p4	p5	p6
30	p7	p8	p9

Numero de probeta	FOCUS OFFSET CONTORNO (mAh)
p1	15
p2	16
p3	17
p4	18
p5	19
p6	20
p7	21
p8	22
p9	23

Ilustración 3. Definición del plan de experimentos para la mejora de la calidad superficial mediante la modificación de los parámetros.

A continuación se muestra con detalle las nueve probetas fabricadas cada una de ellas con unos parámetros determinados.



Ilustración 4. Piezas obtenidas con la variación de parámetros EBM en la aleación Ti6Al4V

Diseño de experimentos de la tecnología SLS

La experimentación se centra en la evaluación de diferentes variables de rugosidad superficial obtenida en probetas fabricadas bajo parámetros y condiciones de construcción diferentes con el fin de establecer criterios para mejorar el acabado superficial de piezas fabricadas en sinterizado láser.

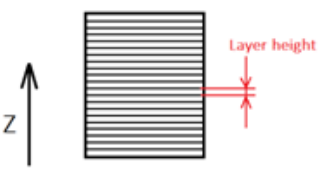
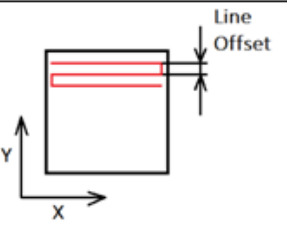
PARÁMETRO	DEFINICIÓN	ESQUEMA
Usos del Polvo	Número de veces que se ha utilizado el polvo con anterioridad.	
Espesor de capa	Distancia entre capas.	
Line Offset	Distancia entre líneas de escaneo	
PID Set Point	Temperatura superficial en la cuba de material	Temperatura de aproximación a sinterización.
Potencia Láser	Potencia del láser	Salto térmico de sinterizado.

Ilustración 5. Variables analizadas

Además de los parámetros de la tabla anterior. Se evaluaron también los siguientes parámetros:

- Colocación de las probetas en la bandeja
- Scan spacing
- Orientación de la probeta (inclinación)
- Giro en un plano.

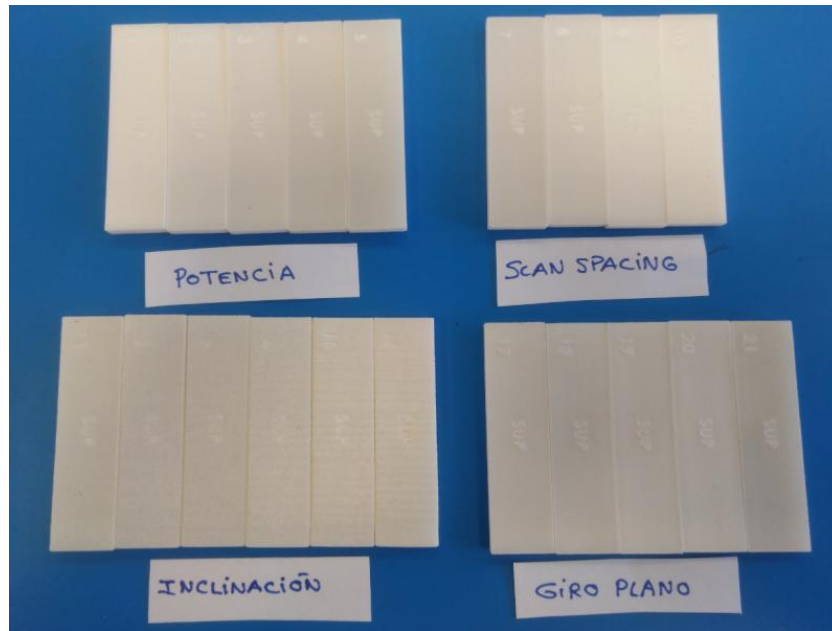


Ilustración 6. Piezas de SLS

Tarea 1.3. Caracterización de las probetas

En función de la tecnología se ha utilizado un medio diferente para la caracterización de las probetas. Las probetas de titanio fabricadas con la tecnología EBM se han evaluado con corte metalografico y el análisis de imagen NIS-Elements y con un microscopio óptico NIKON Eclipse LV100. Midiendo la diferencia entre el valle más acusado y el pico más elevado. En el caso de SLS se ha utilizado un rugosímetro, Mitutoyo SJ-301 Surface roughness tester para su evaluación. A continuación se muestran los resultados y las conclusiones obtenidas tras la caracterización de todas las probetas.

Tecnología de EBM para el procesamiento de metales:

Existe una gran cantidad de parámetros de fabricación que influye directamente en la calidad de las piezas. Entre todos los parámetros del proceso se ha evaluado la influencia del line offset y el focus offset (melt y contorno).

Tras la evaluación de la rugosidad superficial así como de la cantidad de iniciadores de grietas en cada una de las opciones evaluadas. Las muestras con mejores resultados son las muestras 2, 3 y 5 con valores de rugosidad en torno a las 360 micras sin contar con la zona de soportes que siempre tiene una elevada rugosidad superficial porque es la zona marcada de la pieza. De las tres muestras la que presenta más uniformidad en los resultados en la **muestra 5** que corresponde a unos parámetros de proceso medios, **line offset de 0.12 mm, focus offset melt de 25 mA y focus offset de contorno de 19 mA.**



**GENERALITAT
VALENCIANA**

**TOTS
A UNA
VEU**

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

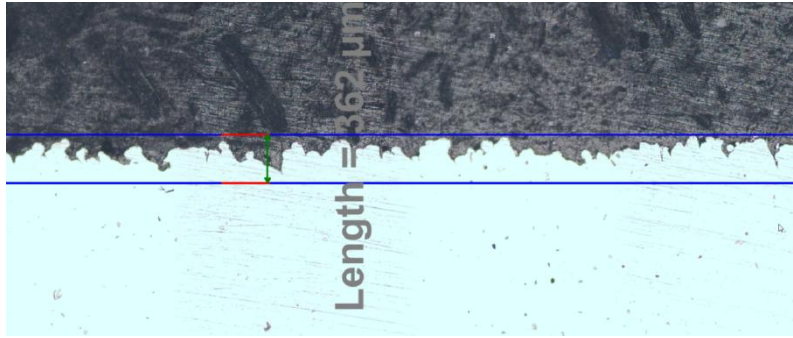


Ilustración 7. Perfil y medición de la rugosidad de la muestra 5.

Además cabe destacar que las probetas fabricadas con mayor focus offset, presentan en el interior faltas de fusión importantes. Por lo tanto, es imposible la fabricación de piezas con estos parámetros de focus offset tan altos. También es mejor el uso de un line offset medio en lugar de elevado. Lo mismo ocurre con el focus offset de contorno elevados que provoca un perfil más escarpado con polvo sin fusionar adherido a la superficie.

Tecnología de SLS para el procesamiento de poliamida:

Tras el desarrollo del plan establecido, se puede concluir que mantener una potencia en torno a 14 W y un scan spacing de 0.11 mm (menor que el standard) mejora la rugosidad superficial de las piezas.

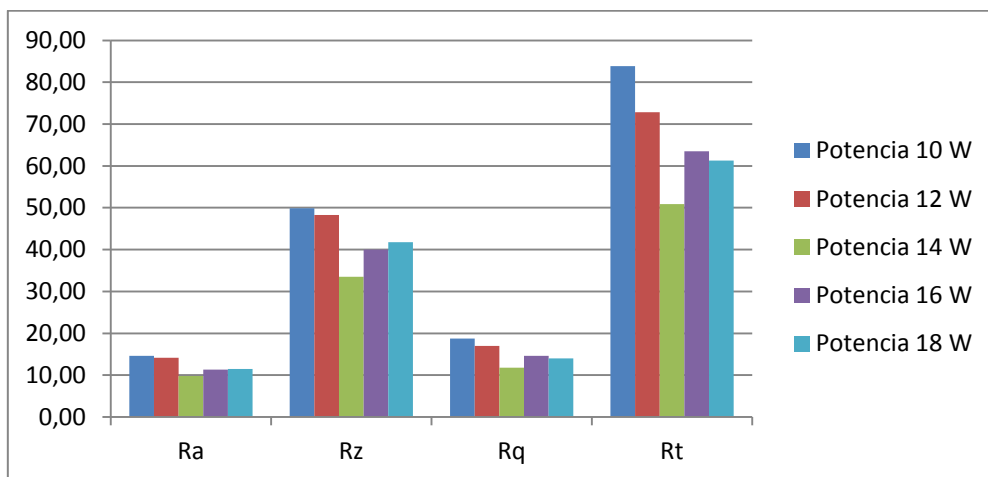


Ilustración 8. Rugosidad superficial en función de la potencia

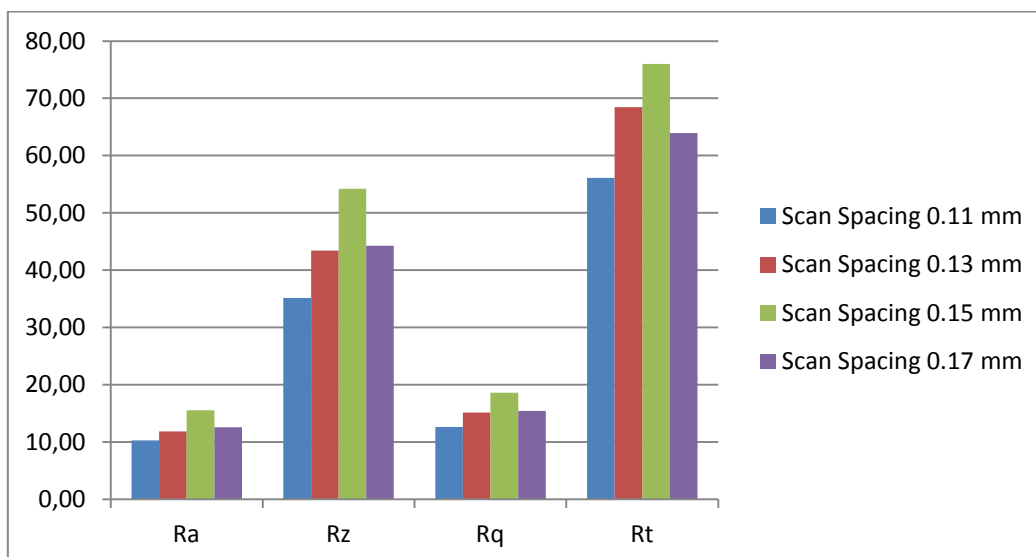


Ilustración 9. Rugosidad superficial en función del scan spacing

Por otra parte la orientación tanto en el plano x-y (giro en plano) como la orientación en el plano z (inclinación) son los parámetros que no dependen de la máquina sino del personal técnico que coloca las piezas en la bandeja de fabricación. Dentro de estos dos parámetros el más crítico es la inclinación que se le da a las piezas o probetas, debiendo evitar, en la medida de lo posible, inclinaciones de 15 y 60 grados para las superficies críticas de una determinada pieza.

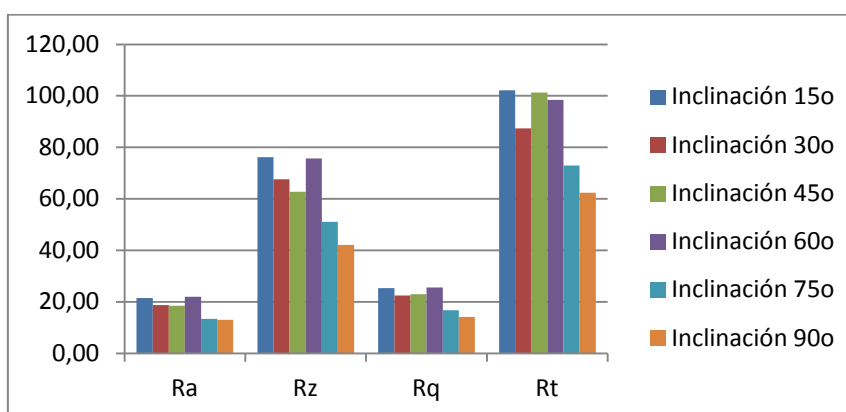


Ilustración 10. Rugosidad superficial en función de la inclinación de la probeta en la bandeja

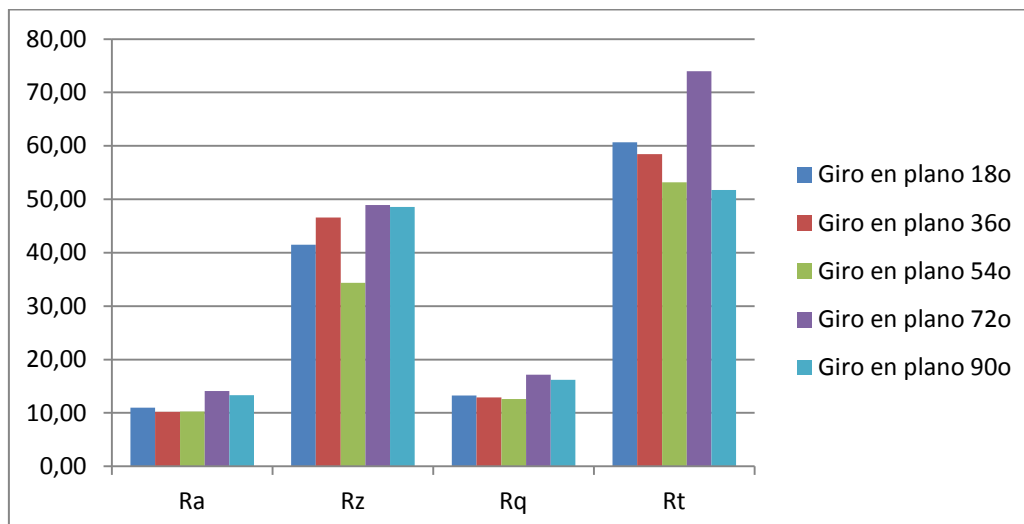


Ilustración 11. Rugosidad superficial en función de la inclinación de la probeta en la bandeja

Mediante la modificación de los parámetros de proceso de la tecnología SLS y de la orientación y colocación de las probetas en la bandeja de fabricación es posible obtener valores de Ra en torno a 10 micras.

PAQUETE DE TRABAJO 2. MEJORA DE LA CALIDAD SUPERFICIAL DE PIEZAS FABRICADAS CON TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE POST PROCESOS MECÁNICOS, QUÍMICOS Y ELECTROQUÍMICOS.

Tarea 2.1. Análisis de los postprocesos mecánicos, químicos y electroquímicos para la mejora de la calidad superficial de piezas procesadas con fabricación aditiva.

Se han evaluado diferentes post procesos en función de la tecnología de fabricación aditiva y del material que se ha procesado. En el caso de la tecnología EBM y material titanio se ha evaluado la mejora de la calidad superficial mediante post procesos mecánicos, químicos y electroquímicos. En el caso del cobre se han evaluado procesos químicos y mecánicos. Para la tecnología de SLS y en concreto para piezas de poliamida se han evaluado post procesos mecánicos, como son granallado y vibrado.

Tarea 2.2. Establecimiento de un diseño de experimentos. Definición, fabricación y desarrollo de experiencias.

Para cada tecnología y para cada material se ha establecido un plan de experimentos específico, se han definido, diseñado y fabricado piezas sobre las que se han aplicado los post procesos establecidos.

Tecnología EBM para piezas de Titanio

A continuación se muestra un esquema de los tratamientos evaluados:



Ilustración 12. Plan de experimentos de post procesos para mejora de la calidad de piezas de titanio fabricadas con EBM

Para el desarrollo de este plan de experimentos se fabricaron este tipo de muestras:

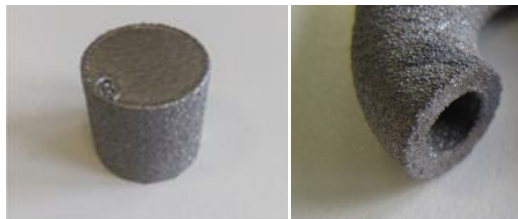


Ilustración 13. Muestras evaluadas

Tecnología EBM para piezas de cobre

El plan de experimentos con el cobre se ha centrado en evaluar fundamentalmente dos aspectos:

1. Eliminar el polvo de cobre atrapado en un canal interior mediante un postproceso químico.
2. Granallado de la superficie con el fin de cerrar grietas.

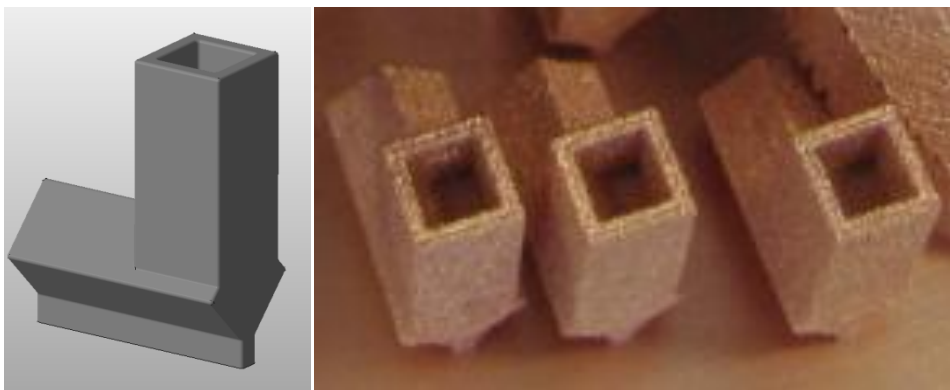


Ilustración 14. Diseño de la probeta de ensayo y las piezas fabricadas en cobre

Tecnología SLS para piezas de poliamida

Se han considerado dos medios mecánicos para el acabado de piezas de poliamida, en concreto el granallado mediante microesferas de vidrio de diferente diámetro, en unas determinadas condiciones y el vibrado de piezas en una pequeña hormigonera adaptada a este fin donde las piezas rotan junto un material abrasivo, el mismo material utilizado en el proceso de granallado.

Post proceso	Diámetro microesferas (micras)	Presión (Bar)	Tiempo (segundos)	Ref. Probetas
Granallado	100/200	4.5	10	1
			20	2
			30	3
		9	10	4
			20	5
			30	6
	300/400	4.5	10	7
			20	8
			30	9
		9	10	10
			20	11
			30	12
	600/800	4.5	10	13
			20	14
			30	15
		9	10	16
			20	17
			30	18

Post proceso	Inclinación de la hormigonera	Tiempo (minutos)	Material abrasivo	Referencia Probetas
Vibrado	Inclinación 1	30	microesferas vidrio 600/800	19
		60	microesferas vidrio 600/800	20
		90	microesferas vidrio 600/800	21

Ilustración 15. Post tratamientos evaluados para la tecnología SLS



A continuación se muestra una imagen con las probetas de poliamida fabricadas para el plan de experimentos anterior.

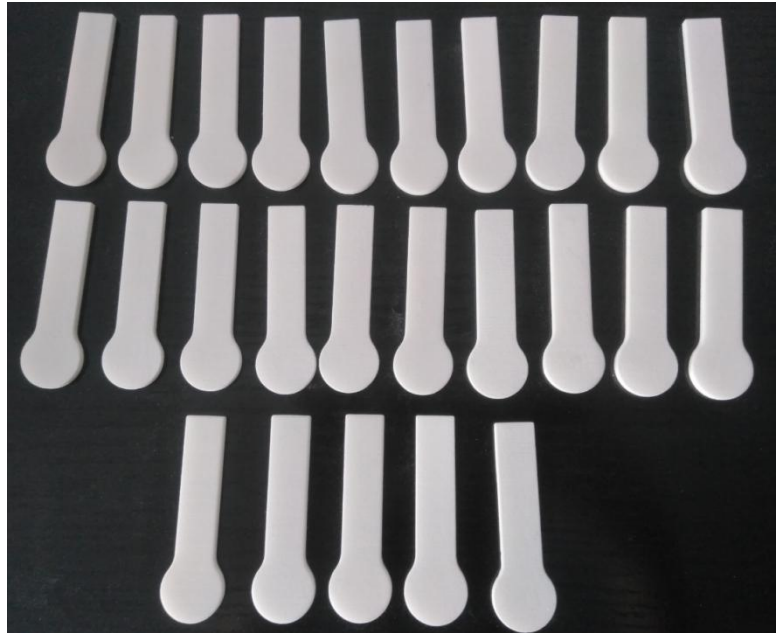


Ilustración 16. Probetas de poliamida para plan de experimentos

Tarea 2.3. Caracterización de las probetas.

En función del material de las probetas, se ha caracterizado el resultado de la aplicación de los postprocesos establecidos en el diseño de experimentos bien mediante la medida de la rugosidad superficial con un rugosímetro para piezas de poliamida y mediante metalografía en el caso de metales como el titanio o el cobre. A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos tras el desarrollo del plan de experimentos.

Tecnología EBM para el procesado de titanio:

En el caso del procesado de titanio se han evaluado diferentes post procesos mecánicos, químicos, combinación de procesos mecánicos-químicos y procesos eletroquímicos.

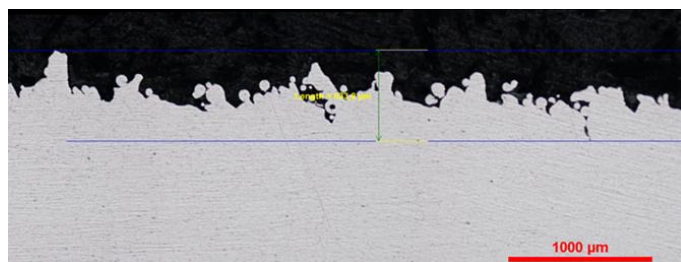


Ilustración 17. Perfil de la superficie en estado as built

- Procesos mecánicos. Estos procesos afectan a la superficie exterior de las piezas, se reduce notablemente la rugosidad medida como la distancia entre picos y valles. Se observa que afecta principalmente a los picos de los perfiles de la superficie

aplastándolos, pero los valles siguen teniendo formas agudas que pueden ser iniciadores de grieta.



Ilustración 18. Procesos mecánicos

- Procesos químicos. Estos procesos afectan a la superficie exterior e interior de las piezas. Se ha establecido un plan de experimentos donde se ha modificado el ácido y el tiempo de exposición de una pieza en dicho medio ácido. Como se observa en los resultados, se eliminan las partículas de polvo adheridas a la superficie y afecta igualmente a picos y valles. Tras el desarrollo de las experiencias, se considera que mediante la limpieza química estudiada en este proyecto, no se llega a los resultados deseados puesto que sigue apareciendo un perfil con mucha diferencias entre picos y valles. Además los valles presentan todavía zonas agudas que pueden llevar a producir iniciadores de grieta cuando una pieza está sometida a fatiga. Los resultados en todas las pruebas son similares, no se observa un ataque ácido a la superficie que le haga cambiar el perfil. La ventaja principal de estos post procesos es la eliminación de partículas de polvo adheridas a la superficie.

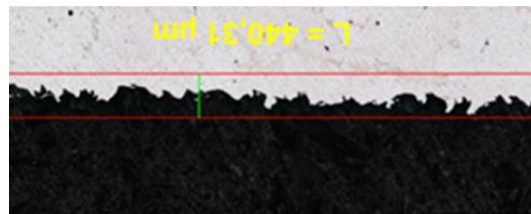


Ilustración 19. Procesos químicos

- Combinación de procesos. La reducción de rugosidad es similar independientemente del orden de la aplicación de los mismos, como consecuencia del granallado los picos están aplanados pero siguen apareciendo valles no tan redondeados como se esperaba. La combinación de procesos mecánicos y químicos es la opción más adecuada y con la que se consiguen resultados más uniformes, los picos están aplanados pero los valles siguen presentando zonas agudas que pueden llevar a la rotura de una pieza cuando está sometida a esfuerzos de fatiga.



Ilustración 20. Combinación de procesos físicos y químicos

- Procesos electroquímicos. Las principales variables de los procesos electroquímicos para su utilización como tratamiento superficial son: disolución de ataque, intensidad y voltaje de trabajo, distancias entre cátodo y ánodo, tiempo, temperatura y agitación. No suelen ser procesos únicos o individuales, suelen combinarse con otros pre o post procesos que mejoren las condiciones de trabajo de los mismos, ya que los procesos electroquímicos suelen utilizarse para afinar superficies, las altas desviaciones en cuanto a acabados superficiales con muchas diferencias entre picos y valles, por ello no suelen ser adecuados estos procesos por sí solos. En el proyecto solo se ha evaluado este proceso por sí solo para establecer el protocolo de trabajo y las condiciones de aplicación. Tras varias pruebas se puede observar que este método es el más agresivo y que más afecta al estado superficial de las piezas de titanio fabricadas con EBM.



Ilustración 21. Electropolido

Tecnología de fabricación aditiva SLS para el procesado de poliamida.

Se han evaluado dos postprocesos físicos o mecánicos como son el granallado y vibrado cada uno de ellos con diferentes condiciones y parámetros de aplicación.

- Granallado. Tras la evaluación de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial tras la aplicación de diversos granallados con diferentes condiciones de diámetros de esferas de vidrio de granallado, presión y tiempo de aplicación se puede concluir:
 - que pese a que el proceso es manual y por lo tanto depende del usuario así como de la zona de la pieza dependiendo de la incidencia de la granalla en una determinada zona, el tamaño de las microesferas es muy influyente siendo las de tamaños mayores más adecuadas (300/400 y 600/800) para reducir la rugosidad superficial.
 - Con respecto al tiempo, las muestras sometidas 10 segundos obtienen peores resultados, por lo tanto el tiempo de aplicación mínimo debe estar en torno a 20 segundos.

- Las presiones no son tan influyentes para microesferas de tamaño mayor, a priori no es tan influyente, aunque en las pruebas realizadas las presiones de 9 bares han obtenido mejores resultados. Por lo tanto se establecen las siguientes medidas para realizar granallados utilizar microesferas de vidrio de diámetros 300/400 y 600/800 micras durante 20 segundos y con una presión de 9 bares.
- En el caso de las microesferas de 600/800 micras, los técnicos que hicieron el granallado observaron que las microesferas saltaban mucho y chocaban violentamente contra el cristal de la granalladora, por este motivo se considera más adecuado el uso de la microesferas de 300/400 micras para el granallado y se deja el material de mayor diámetro como material para las pruebas de vibrado.

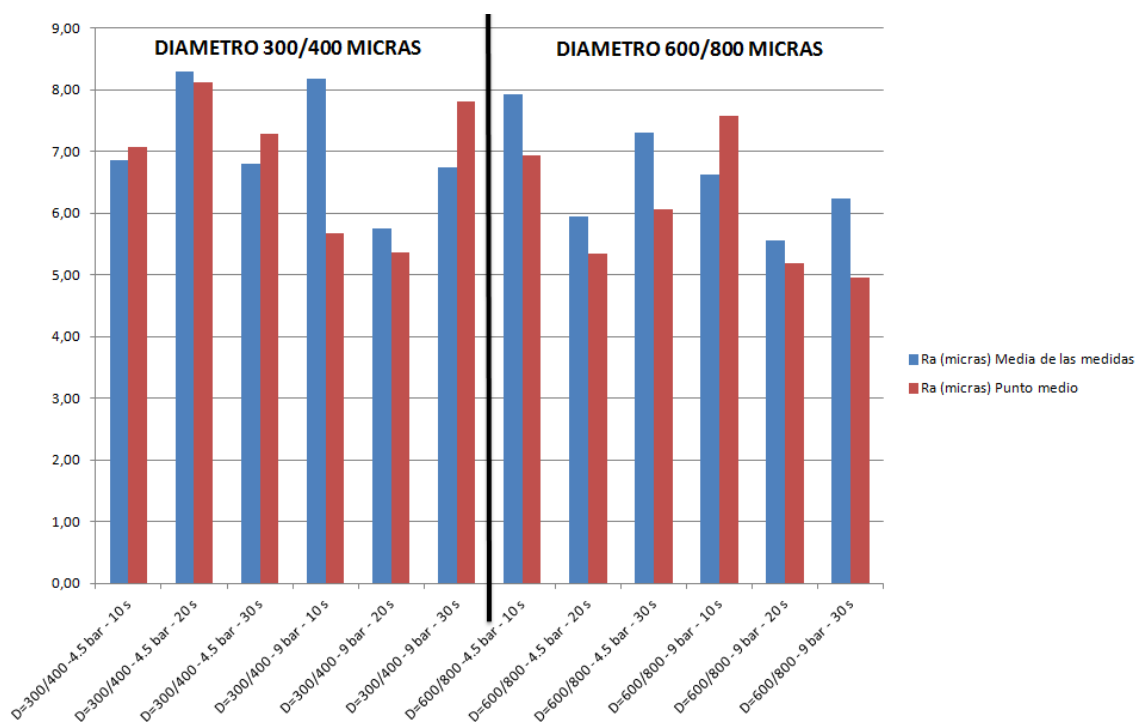


Ilustración 22. Izquierda muestra as built y derecha muestra granallada

Tal y como se observa en la anterior imagen es posible afirmar que el granallado mejora la rugosidad superficial de las piezas de poliamida obteniéndose valores en torno a Ra de 5 micras, aproximadamente un 72% de reducción con respecto a los valor de rugosidad de una pieza a la que no se le ha aplicado ningún postproceso.



Ilustración 23. Efecto del granallado en la superficie

- Vibrado. El proceso de vibrado es más uniforme, empieza a hacer efecto a partir de una hora de vibrado de las piezas con las pruebas que se han realizado. No se obtienen rugosidades tan bajas como en el caso del granallado. También es importante destacar que las pruebas de vibrado en piezas industriales no han sido satisfactorias ya que se desgastan los filos de las piezas, además en las piezas no se aprecia que mejore visualmente la calidad de la superficie. Por lo tanto, en las condiciones y con el equipamiento utilizado en el proyecto no se considera adecuado para el acabado de piezas.

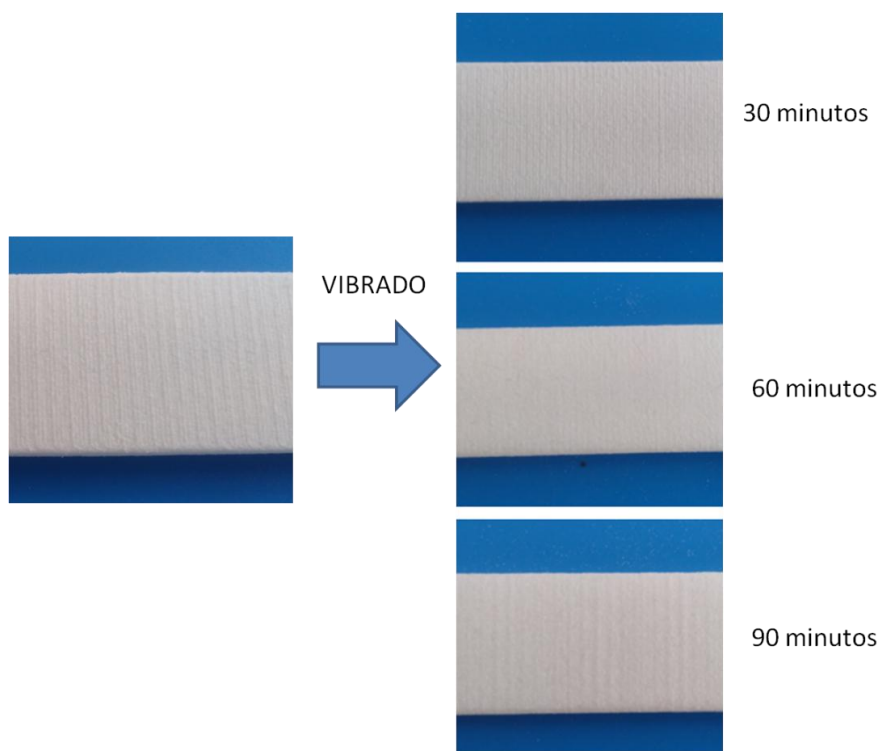


Ilustración 24. Efecto del vibrado en la superficie

PAQUETE DE TRABAJO 3. DESARROLLO DE PROCESO DE SOLDADURA “BRAZING” ADAPTADO A LA MEJORA DE CALIDAD SUPERFICIAL DE LA UNIÓN DE DOS PIEZAS FABRICADAS CON FABRICACIÓN ADITIVA DE METAL.

En este paquete de trabajo se han realizado las siguientes actividades:

Tarea 3.1. Evaluación de los procesos de soldadura más adecuados para la unión de piezas metálicas.

Se han evaluado los procesos de soldadura más adecuados para la unión de piezas procesadas con EBM, en concreto centrándonos en el proceso de brazing.

La soldadura de Brazing, es un proceso de unión térmica en el que el metal de aporte, se calienta hasta su fusión fluyendo por capilaridad entre la holgura que existe entre los materiales a soldar y uniendo sus superficies por atracción atómica y mediante difusión.

El material de aporte tiene un punto de fusión por encima de los 450°C, pero siempre por debajo del punto de fusión de los componentes que va a unir. Las características físicas y químicas del material de aporte son completamente diferentes de las piezas que va a soldar. Una característica notable de esta técnica es su capacidad para unir materiales disimilares y componentes con masas y tamaños distintos.

Tarea 3.2. Desarrollo de experimentos mediante probetas y caracterización de resultados

Se ha desarrollado un plan de experimentos con probetas para establecer las condiciones de uso de este proceso de soldadura. El experimento planteado en este proyecto se ha centrado en la soldadura mediante el proceso de brazing de piezas de cobre. La pasta de soldadura que se ha empleado en el desarrollo del proyecto corresponde a la referencia 38272 A5 PN de castolin eutectic con temperatura de fusión entre 780 y 870°C, apta para realizar soldadura brazing entre piezas de cobre y con una temperatura de fusión de un 146% respecto a la temperatura máxima de trabajo de la pieza. Por tanto, se la considera apta por resistencia térmica.

Tras el desarrollo del plan de experimentos y la caracterización de resultados se puede concluir:

- Aparentemente, en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas por brazing, se observan poros de tamaño cercano a 250µm. Es necesario aplicar mayor cantidad de material con el fin de evitar porosidad en el cordón de soldadura.
- Modelar chaflanes o geometrías que faciliten la aplicación y deposición de la pasta de soldadura, mitigan la presencia y tamaño de los poros.
- El proceso brazing aplicado parece ser apto para la aplicación en piezas reales que requieran estanqueidad y disipación, ya que aunque pueden aparecer poros, se aprecia claramente que no son poros interconectados.

PAQUETE DE TRABAJO 4. ACTIVIDADES DE DEMOSTRACIÓN APLICADO A GEOMETRÍAS OPTIMIZADAS DE PRODUCTO

En este paquete de trabajo se han realizado las siguientes actividades:



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

Tarea 4.1. Identificación de los casos estudio

Se ha identificado un caso estudio para demostrar los resultados del proyecto. El mismo caso ha sido optimizado mediante el software Altair Hyperworks para dos materiales diferentes, poliamida y titanio. Lo que lleva a modelos diferentes partiendo de una misma pieza.

Para evitar problemas de confidencialidad con empresas, se ha partido de un caso tipo, específico para este proyecto, que representa un bracket o soporte como elemento estructural, que es un elemento utilizado en muchos sectores como el aeronáutico. Los soportes que forman parte de un motor de reacción (jet engine) de un avión, soportan el peso de dicho motor sin deformarse.



Ilustración 25. Izq: Motores de un avión; Dcha: . Motor de reacción (jet engine). Fuente General Electric

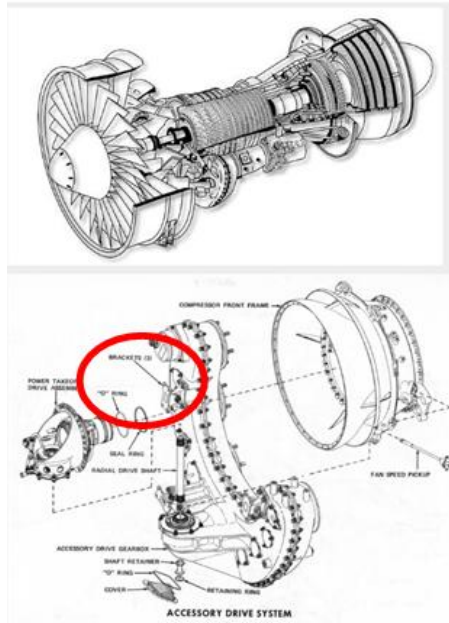


Ilustración 26. Despiece de un motor de reacción. Fuente: <http://www.perspectx.com/blog/?tag=ge-engines>

Tradicionalmente un soporte se fabrica mediante mecanizado a partir de un tocho de material en Titanio. A continuación se muestra un modelo de soporte diseñado para este proyecto y con el fin de ser optimizado y fabricado con tecnologías de fabricación aditiva.

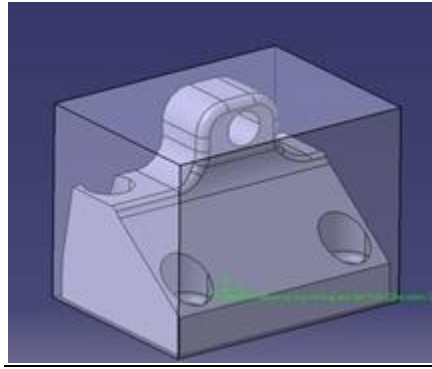
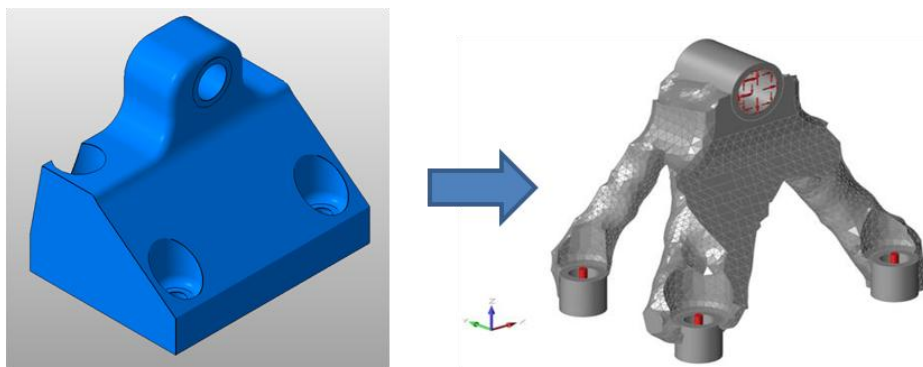


Ilustración 27. Diseño inicial del soporte embebido en el tocho de material

El objetivo del proceso de optimización es reducir el material de una pieza dejando la cantidad necesaria para que soporte las condiciones de carga a las que se ve sometido durante su uso.



Volumen pieza: **150.700 cm³**

Volumen pieza: **25.82 cm³**

Ilustración 28. Ejemplo proceso de optimización (una de las alternativas evaluadas en el proyecto)

Tarea 4.2. Desarrollo de un procedimiento de diseño y fabricación de piezas optimizadas.

Se ha desarrollado una metodología de optimización de piezas tal y como se muestra en la siguiente imagen y se ha puesto en práctica mediante la optimización de varias alternativas para poliamida y para titanio.

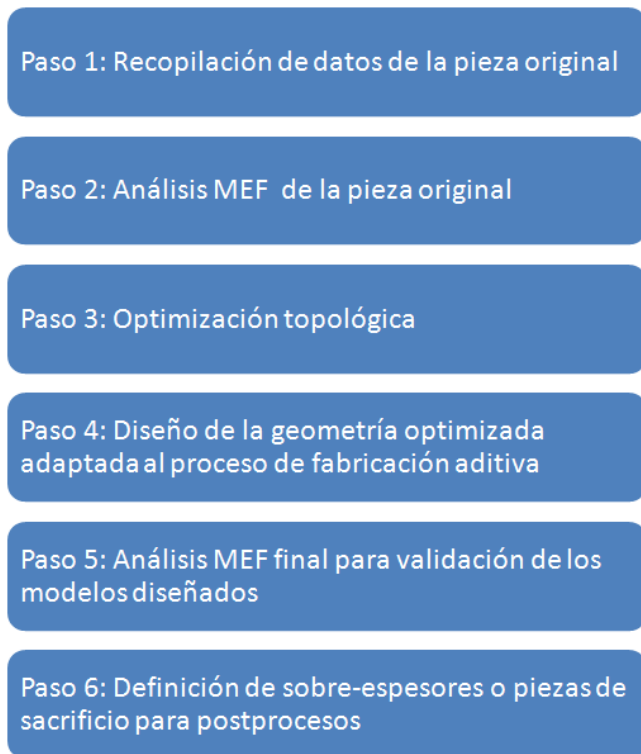


Ilustración 29. Resumen de la metodología de optimización

Tarea 4.3. Desarrollo de los casos estudioPoliamida:

Partiendo del modelo original, diseño convencional del soporte, se ha realizado la optimización del diseño mediante el software de optimización Inspire de Altair. En el caso de la poliamida se han establecido cuatro condiciones de carga, se ha optimizado y calculado con una carga de 3000 N en las direcciones establecidas.

El programa de optimización tiene numerosos parámetros que influyen en el tiempo de simulación y es clave conocer la influencia de los mismos para establecer en qué condiciones se debe realizar la optimización. Uno de esos parámetros son las restricciones de espesor que permiten fijar un tamaño máximo y mínimo para la generación del sólido optimizado. Dichos parámetros afectan directamente al tamaño de malla de forma que al considerar espesores más pequeños el tamaño de malla también se reduce.

En principio se obtiene más precisión en los resultados al reducir el espesor pero el tiempo de cálculo se incrementa notablemente. Así pues, se ha establecido un plan de experimentos para conocer la influencia de este parámetro.

Valor restricción de espesor (mm)	Modelo	Número de piezas
8	1	3
4	2	3
2	3	3

En función del valor de restricción de espesor y con las mismas condiciones de carga y factor de seguridad se han obtenido los siguientes modelos, que como se observa difieren unos de otros independientemente de la carga, tanto en forma como en volumen.

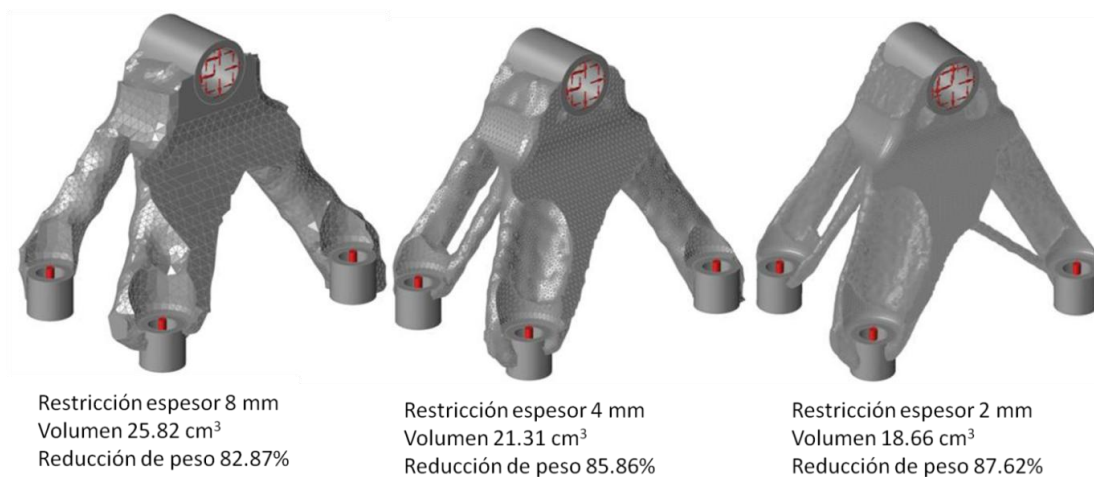


Ilustración 30. Diseño del soporte en poliamida en función del valor de la restricción del espesor

Además de evaluar el parámetro de espesor, se ha evaluado la orientación de fabricación con respecto al diseño optimizado. La tecnología de SLS no necesita soporte así que se ha seleccionado uno de los modelos anteriores, en concreto en modelo 2 con un valor de 4 mm de espesor y se ha fabricado en dos orientaciones adicionales 45 y 90 grados con respecto al eje Z de fabricación tal y como se muestra en la siguiente imagen:

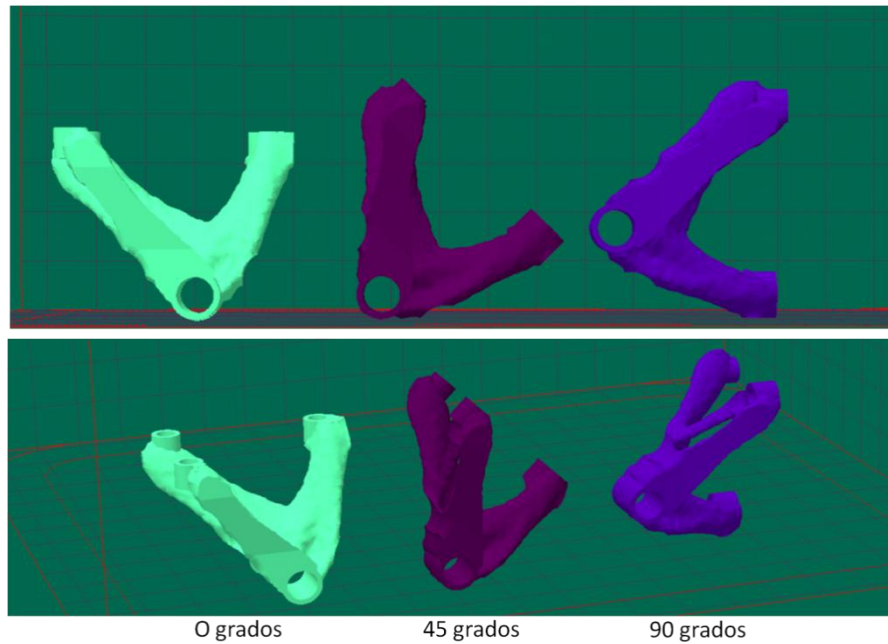


Ilustración 31. Distintas orientaciones de fabricación del modelo 2 (espesor 4 mm)

Orientación de fabricación (grados)	Valor restricción de espesor (mm)	Modelo	Número de piezas
0	4	2	3
45	4	2	3
90	4	2	3

Una vez obtenido el modelo optimizado se evalúa su resistencia y se determina la carga teórica de rotura utilizando el mismo la misma herramienta de cálculo de Inspire, obteniendo los siguientes resultados:

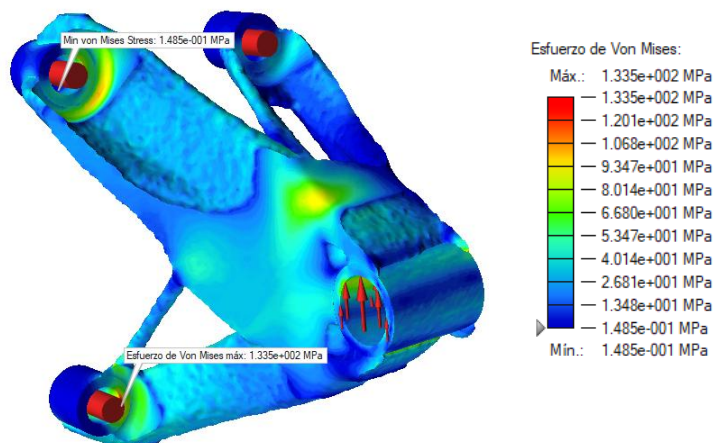


Ilustración 32. Tensiones soportadas por el modelo 1 (restricción de espesor 2 mm)

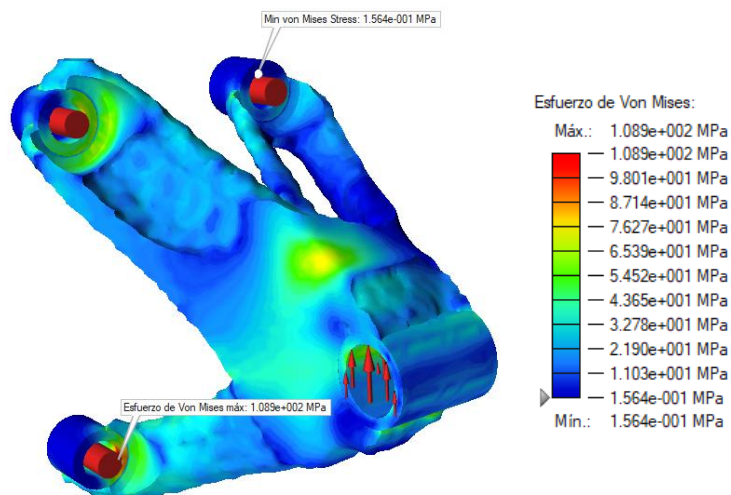


Ilustración 33. Tensiones soportadas por el modelo 2 (restricción de espesor 4 mm)

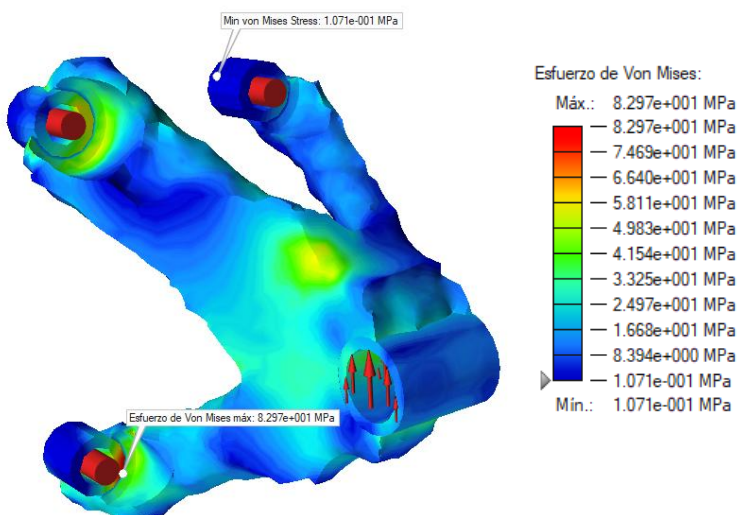


Ilustración 34. Tensiones soportadas por el modelo 3 (restricción de espesor 8 mm)

Puesto que se trata de un cálculo lineal, a partir de los valores obtenidos en el cálculo se puede determinar la carga a la que comenzara la plastificación y la carga a la que comenzara la rotura.

POLIAMIDA		
Espesor	Tensión máxima (MPa) para 3000N	Carga (N) límite rotura 48 MPa
2	133,5	1078,7
4	108,9	1322,3
8	82,97	1735,6

Titanio:

Partiendo del mismo diseño inicial del soporte, se han obtenido 4 modelos optimizados diferentes cada uno de ellos obtenido mediante unos parámetros de optimización diferentes. En el caso de la tecnología de EBM para la fabricación de piezas en titanio, la orientación de fabricación es crucial para la definición de los soportes para la evacuación del calor durante el proceso fabricación. Por lo general, una vez definida la orientación de fabricación todas las superficies que estén en un límite de 45 grados necesitan soportes. El software Inspire, además de la restricción de espesor, permite aplicar una restricción de ángulo llamada Overhang. Para evaluar la eficacia de esta restricción se han diseñado piezas que incluyen esta restricción. Es decir, se le ha indicado al software la orientación de fabricación, del mismo modo se ha realizado un diseño sin dicho overhang, dejando que proponga una optimización independientemente de la orientación de fabricación.

La carga aplicada al bloque de partida para la optimización es de 5000 N en diferentes direcciones y sentidos, se ha seleccionado para todos los casos una restricción de espesor de 6 mm y un factor de seguridad de 5. Una vez obtenido el modelo optimizado se rediseñan las superficies mediante la herramienta polynurbs para suavizar los contornos del sólido y eliminar las aristas y defectos del resultado de la optimización. Tras el proceso de rediseño se recalculan los modelos aplicando una carga de 5000 N para evaluar el estado de tensiones de las piezas en comparación con la geometría optimizada de partida.

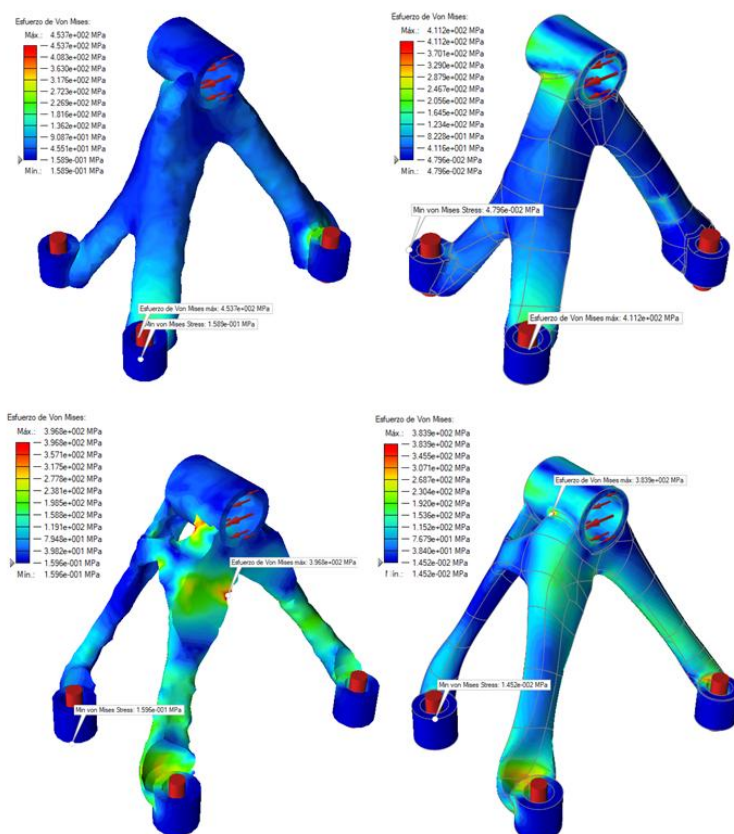


Ilustración 35. Recalculo de los modelos para una carga de 5000 N



GENERALITAT
VALENCIANA

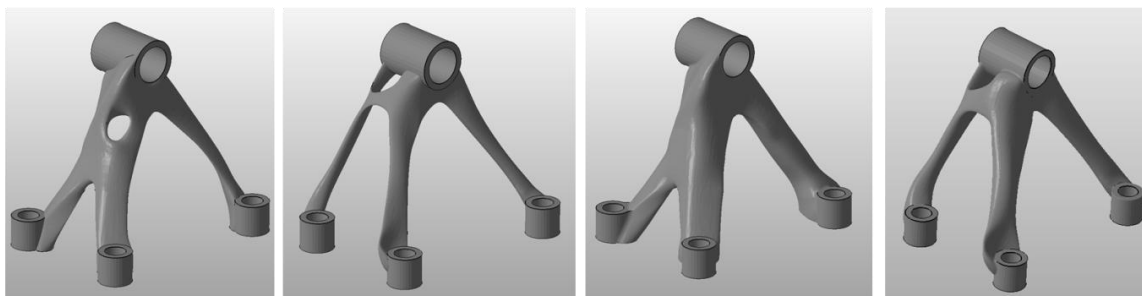
TOTS
A UNA
VEU

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

Dado que el nivel de tensiones con esta combinación de cargas y factor de seguridad es muy elevado surge la necesidad de adelgazar ambos diseños para asegurar la rotura de ambos modelos para la carga de 5000 N y así poder realizar ensayos reales de rotura para su comparación.

**Modelo 1**

Overhang- diseño a rotura

Volumen 10,64 cm³

Reducción peso: 92.94%

Modelo 2

No Overhang- diseño a rotura

Volumen 7,10 cm³

Reducción peso: 95.29%

Modelo 3

Overhang- No rotura

Volumen 18,73 cm³

Reducción peso: 87.57%

Modelo 4

No Overhang- No rotura

Volumen 11,87 cm³

Reducción peso: 92.12%

Ilustración 36. Modelos optimizados en titanio.

Los modelos de titanio que se han optimizado con la opción de overhang se han optimizado definiendo previamente la Z de producción o lo que es lo mismo la orientación de fabricación de la piezas. Dada la limitación establecida de overhang, la reducción de material no es tan acusada como en el caso de no incluir esta limitación. Por lo tanto las piezas con overhang se han fabricado tal y como se muestra en la siguiente figura.

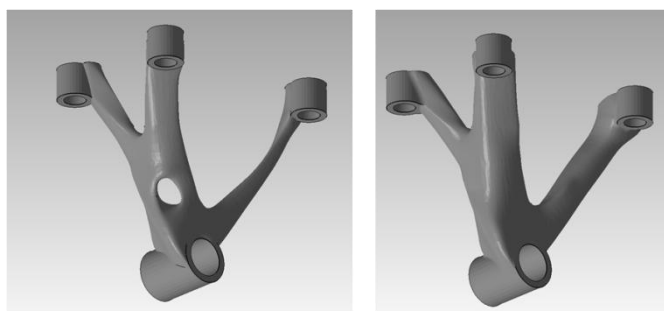
**Modelo 1 (Rotura)****Modelo 3 (No rotura)**

Ilustración 37. Orientación de fabricación de los modelos con Overhang

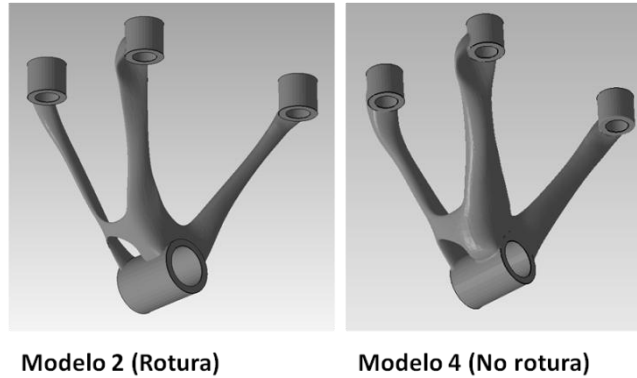


Ilustración 38. Orientación de fabricación de los modelos sin Overhang (decidida por el técnico de la tecnología EBM utilizando como criterio minimizar soportes)

Para asegurar que los modelos a rotura rompen, se ha realizado un cálculo con el software Ansys, obteniendo los siguientes resultados:

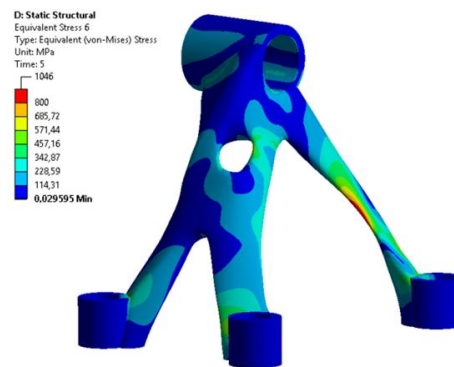


Ilustración 39. Modelo 1 sometido a 5000 N en caso de carga 1

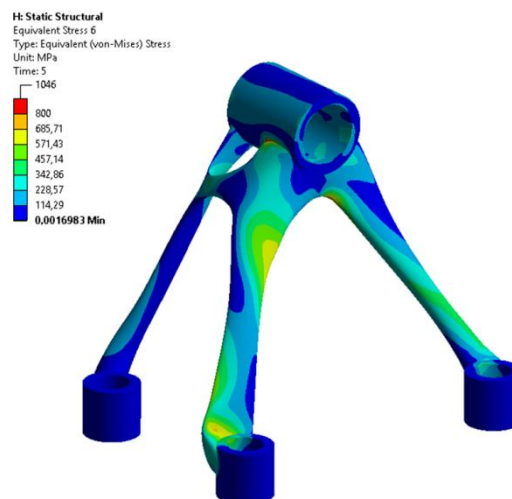


Ilustración 40. Modelo 2 sometido a 5000 N

En vista de los resultados de los cálculos para 5000N se puede observar que los demostradores tienen zonas considerables con tensiones máximas en torno a los 800MPa. Comparando estos resultados con la tensión de rotura del material de 1020 MPa y puesto que se trata de un cálculo lineal, la carga de rotura correspondería a 6375 N.

Para conocer la validez de la metodología de optimización basada en el uso del software de optimización Inspire de Altair, se han fabricado y se han realizado ensayos de producto para comparar los resultados de los ensayos con los resultados de los cálculos y conocer la validez o la variabilidad del proceso.



Ilustración 41. Casos estudio fabricados en poliamida



Ilustración 42. Casos estudio fabricados en titanio

Tarea 4.4. Validación del procedimiento de optimización mediante ensayos dinámicos de producto.

Tras la fabricación de los casos optimizados, los productos se han validado mediante ensayos de producto con el fin de establecer las condiciones más adecuadas de optimización y así establecer una correcta metodología de optimización de piezas. Además se ha realizado un estudio medioambiental para evaluar la mejora de utilizar un producto optimizado con una determinada tecnología.

Para realizar la comprobación de la validez de los diseños optimizados desarrollados con el software Inspire, ha sido necesario plantear un ensayo de producto con los casos de carga establecidos. Para poder hacer el ensayo correctamente se ha diseñado un utillaje específico que permita posicionar la pieza de distintas formas para poder aplicar los esfuerzos determinados.

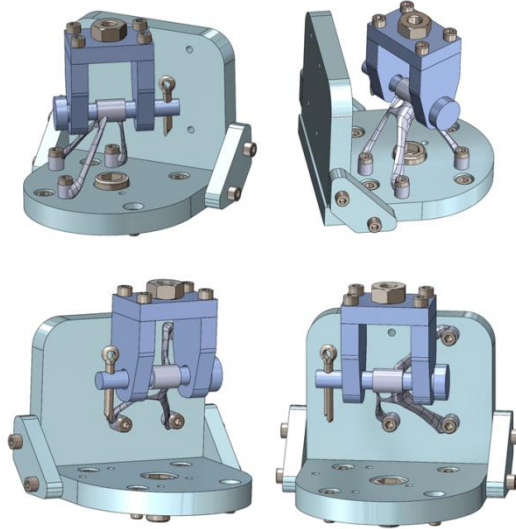


Ilustración 43. Diseño del utillaje con pieza optimizada

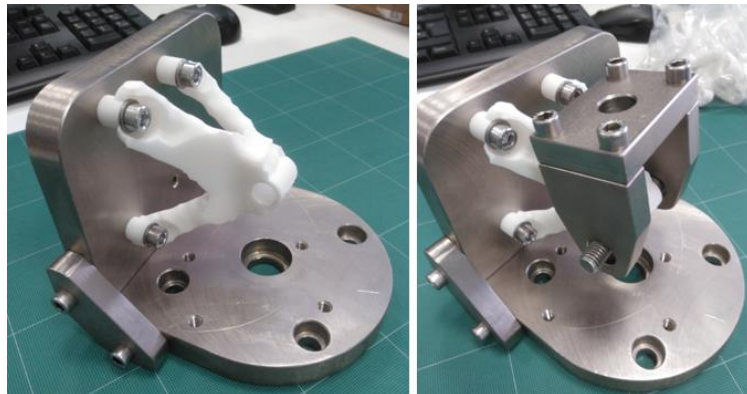


Ilustración 44. Montaje del utillaje con la pieza

Se han realizado los ensayos en máquina obteniendo los siguientes resultados:

Resultados de la validación de las piezas de poliamida:

Analizando la rotura y comparándola con los resultados de la distribución de tensiones de Von Mises se puede comprobar que todas las probetas se rompen en la misma zona de sujeción y corresponde a la zona tensionada del cálculo que contiene el máximo.

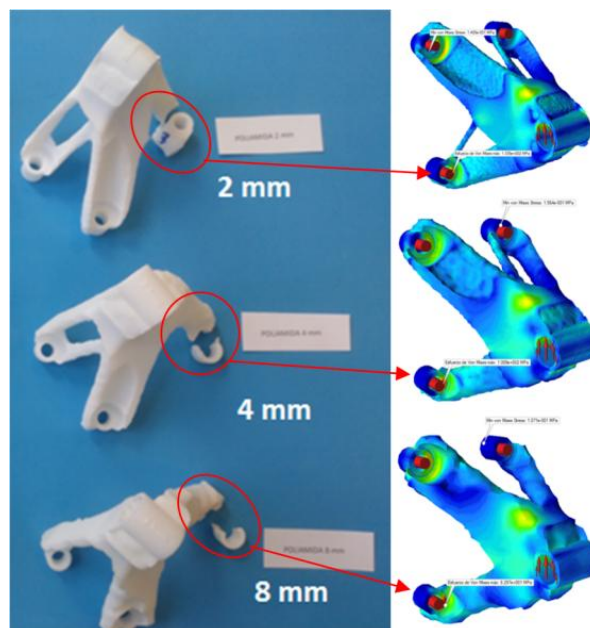


Ilustración 45. Comparación rotura.

Si se comparan los resultados numéricos, aparecen desviaciones con respecto a la carga teórica del 40% para los modelos de 2 y 4 mm. En el modelo de 8 mm la desviación es solamente de un 4% pero la rotura sucede antes de lo que cabe esperar.

MODELO	Carga rotura media (N)	Carga rotura cálculo (N)	Desviación %
2 mm	1843	1078,7	41,5
4 mm	2145	1322,3	38,4
8 mm	1666	1735,6	-4,2

Esto se debe a varios motivos, el primero de ellos es que la geometría de las piezas no está suavizada, ya que se fabricó directamente el resultado del software de optimización. El acabado de fabricación es el mismo en los tres modelos pero la geometría es más abrupta cuanto mayor es el tamaño mínimo ya que está relacionado directamente con el tamaño de malla utilizado para la optimización.

Por otra parte, el cálculo refleja los puntos que superan la tensión de rotura lo que significaría la rotura del material en esos puntos pero no supone que tenga lugar la rotura completa del soporte.

Finalmente hay que destacar que el cálculo se realiza considerando un material lineal y una vez se supera la zona elástica no se puede determinar con certeza el nivel de tensión y deformación real que se alcanza. Es necesario disponer una mejor caracterización del material de poliamida utilizado en fabricación aditiva y sería necesario personalizar el material en el

software de cálculo con más valores de los datos resistentes del mismo. Para solventar esta variación es necesario ajustar correctamente el cálculo, ya sea con los datos del material como el factor de seguridad

Si atendemos a la carga efectiva/peso se puede concluir que los mejores resultados se obtienen con restricciones de espesor medio como es el valor de 4 mm y en principio la orientación de fabricación no es crítica. También cabe destacar que los resultados de los ensayos son de un mismo orden por lo tanto es posible afirmar que la orientación y la colocación de las piezas en la bandeja de fabricación no es crítica.

Resultados de la validación de las piezas de titanio:

Con respecto a los modelos ensayados, a continuación se muestra una tabla comparativa de los resultados medios de los ensayos con los cálculos previos realizados:

MODELO	Carga rotura media (N)	Carga rotura cálculo (N)	Desviación %
2	6428	6375	0,81
4	7354		13,31

MODELO 2

El ensayo de este modelo rompe por una de las zonas de mayor tensión previstas en el cálculo y a una carga similar a la estimada. Sin embargo hay que destacar que existen otras dos zonas de tensiones elevadas en el cálculo por donde cabría esperar la rotura. La rotura puede estar condicionada en este caso por dos factores. En primer lugar, la deformación mostrada en el ensayo modifica la aplicación de la carga pudiendo variar la distribución de tensiones. En segundo lugar, la zona de la rotura es la más próxima a la fijación y es donde la restricción aplicada por la fijación evita que la deformación de la pieza pueda liberar tensiones.



Ilustración 46. Comparación ensayo y calculo modelo 2.

MODELO 1

La rotura de este modelo tiene lugar sin grandes deformaciones y en la zona prevista por el cálculo. En este caso la zona de rotura del ensayo estaba más marcada en el cálculo con un nivel de tensión en el rango de 800 MPa superior al resto de la pieza. Por otra parte, la carga de rotura ha sido un 13% más alta que la esperada y sin registrar a penas parte plástica en el ensayo.



Ilustración 47. Comparación ensayo y cálculo modelo 1.

MODELO 4

El ensayo realizado con el modelo 4 anclado a la vertical no se pudo finalizar debido a la deformación del útil. El siguiente intento en con el anclaje horizontal se finalizó con rotura pero las deformaciones en el pasador del utillaje no hacen validos los valores para compararlos con el cálculo.



Ilustración 48. Imágenes de los ensayos del Modelo 4

Hay que destacar que el titanio tiene un comportamiento más homogéneo y los cálculos se ajustan mejor a los resultados de los ensayos. A pesar de ello una mejor caracterización del material permitiría la utilización de un modelo de cálculo para determinar su comportamiento plástico.

Impacto ambiental:

Se ha evaluado ambientalmente un objeto del sector aeronáutico fabricado en titanio de forma convencional (mediante mecanizado convencional) y su objeto homólogo obtenido mediante fabricación aditiva. En el caso de la fabricación aditiva se han obtenido en el mismo proceso 3 tipos de piezas con geometrías diferentes.

La herramienta utilizada para el cálculo de impactos ha sido el SIMAPRO 8.2.3.0 y los métodos de cálculo utilizados han sido:

- ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A
- ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H
El método ReCiPe Midpoint contempla los impactos individuales e incluye las siguientes categorías de impacto:
 - Cambio climático
 - Agotamiento de la capa de ozono
 - Acidificación terrestre
 - Eutrofización del agua dulce
 - Eutrofización marina
 - Toxicidad humana
 - Formación de oxidantes fotoquímicos
 - Formación de materia particulada
 - Ecotoxicidad terrestre
 - Ecotoxicidad del agua dulce
 - Ecotoxicidad marina
 - Radiación ionizante
 - Ocupación de suelo agrícola
 - Ocupación de suelo urbano
 - Transformación de suelo natural
 - Agotamiento de agua
 - Agotamiento de metales
 - Agotamiento de combustibles fósiles

En cuanto a los resultados obtenidos, se comprueba que en el mecanizado tradicional el mayor impacto se encuentra en la cantidad de material utilizado, mientras que en los objetos obtenidos por fabricación aditiva, el mayor impacto ambiental se encuentra en la fase de producción, debido a la energía consumida en las máquinas de fabricación aditiva.

En cifras globales la fabricación aditiva supone un menor impacto ambiental. En indicadores globales el impacto ambiental de las piezas producidas por fabricación aditiva es inferior al 15% del impacto producido mediante el método convencional. Mientras que en indicadores intermedio el impacto ambiental de las piezas producidas por fabricación aditiva es inferior al 20% del impacto ambiental en todas las categorías de impacto analizadas



Bibliografía

- Safdar, A., He, H.Z., Wei, L.Y., Snis, A. and Paz, L.E.C.D. (2012), "Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V", Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 No. 5, pp. 401-408.
- Mumtaz, K. and Hopkinson, N. (2009), "Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting", Rapid Prototyping Journal, Vol. 15 No. 2, pp. 96-103.
- Sachdeva, A., Singh, S., & Sharma, V. S. (2013). Investigating surface roughness of parts produced by SLS process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 64(9-12), 1505-1516.

**GENERALITAT
VALENCIANA****TOTS
A UNA
veu****IVACE**
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL**UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional*Una manera de hacer Europa***"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"**