

2016

PROYECTO PRECISION FA - DESARROLLO DE UN SISTEMA Y MÉTODO DE TRABAJO PARA EL MECANIZADO DE PIEZAS METÁLICAS FABRICADAS MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Nº Expte IMAMCC/2016/1

Documento resumen del resultado del proyecto



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



Figura 1. Plan de trabajo

A continuación se describen las actividades realizadas en el proyecto:

PAQUETE DE TRABAJO 1. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE DE SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ENTRE FABRICACION ADITIVA Y MECANIZADO

El objetivo de este paquete de trabajo es el estudio del arte de soluciones existentes aplicables al posicionamiento de piezas para mecanizado que garantice precisión, la identificación de los metales de mayor interés a nivel industrial para el uso de las tecnologías de fabricación aditiva y la evaluación de de las tensiones/deformaciones generadas por procesos de fusión/solidificación metálica.

Para la consecución de los resultados se han realizado tres actividades:

Tarea 1.1. Estudio del estado del arte de soluciones aplicables a posicionamiento de piezas para mecanizado que garantice precisión.

La fusión de láser selectiva (SLM) y por haz de electrones (EBM) son unos procesos convencionalmente utilizados para la fabricación de componentes complejos tridimensionales mediante la adición por capas de materias primas metálicas en forma de polvo y posterior fusión mediante aporte de energía. Estos procesos de fabricación son utilizados a modo de referencia y sin carácter limitativo, para la fabricación de productos para aplicaciones dentales, tales como puentes, coronas, implantes; aplicaciones médicas como implantes, instrumental

quirúrgico; o aplicaciones aeroespaciales tales como soportes de fijación, componentes estructurales, piezas de recambio e incluso reparación de piezas dañadas.

Este tipo de proceso (y las piezas obtenidas en él), se han convertido en una solución cada vez más extendida como medio de fabricación, debido generalmente a la posibilidades que ofrece, tales como libertad de diseño, reducción de peso, introducción de geometrías que favorezcan la oseointegración, personalización del producto, introducción de aspectos geométricos que incrementen la funcionalidad y comportamiento, reducción de la cadena de suministro, reducción de stocks, no inversión en utillajes de producción, entre otras.

Las piezas obtenidas mediante este proceso de fabricación suelen requerir posteriormente tratamientos térmicos para obtener las especificaciones mecánicas; y mecánicas tales como el mecanizado para obtener las especificaciones dimensionales requeridas. Sin embargo, este tipo de piezas (y los procedimientos empleados para su fabricación) cuentan con el inconveniente principal, que dificulta que las piezas puedan ser fabricadas de una manera económica, que permita rentabilizar la inversión, aumentando su competitividad en el mercado.

En los procesos de fabricación aditiva mencionados, las piezas se fabrican sobre una placa que actúa como soporte o sustrato sobre el que se apoyan las mismas directamente o través de soportes. Tanto la placa como los soportes generados no forman parte de la geometría de la pieza y posteriormente hay que eliminarlos. Generalmente, una vez realizado el tratamiento térmico, se separan las piezas fabricadas de la placa y se eliminan los soportes. Posteriormente se lleva a cabo la operación de mecanizado de las piezas obtenidas por procesos de fabricación aditiva, de una en una, para poder acceder a toda la geometría con la herramienta de mecanizado.

Para llevar a cabo la fijación y posicionamiento de la pieza en la operación de mecanizado, en ocasiones se utiliza la misma geometría de la pieza final. Esta solución, puede provocar que haya distorsiones en la pieza y pérdida de referencias para el posicionamiento de la pieza en el centro de mecanizado (CNC) lo que inevitablemente, provoca un mayor tiempo de mecanizado, incumplimiento de especificaciones técnicas, problemas de calidad. En otras ocasiones, a pesar de que se utiliza geometría auxiliar de sacrificio fabricada sobre la misma pieza para fijar la pieza en el proceso de mecanizado y que posteriormente habrá que eliminar, puede no garantizar la correcta posición y por tanto, la precisión dimensional requerida. Además, en ambos casos deriva en un mayor gasto económico en la obtención de la pieza y en consecuencia, un aumento del coste final en el mercado, de tal manera que aunque puede tener mayores prestaciones, que otras fabricadas por métodos distintos, no compense en la relación calidad-precio de la misma.

Respecto a las soluciones de mercado que posibilitan el mecanizado por ambos lados se concluye que la solución que mejor se ajusta a la posibilidad de mecanizar piezas fabricadas por tecnologías de SLM por ambos lados es la solución propuesta por la empresa SiSMA (<http://www.sisma.com/spa/>) y la propuesta por la empresa RENISHAW

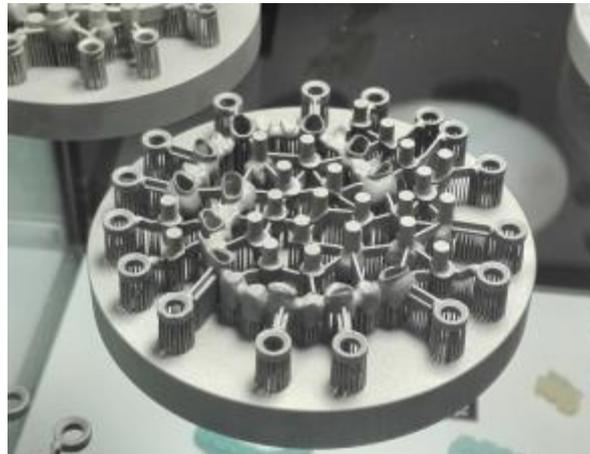


Figura 2. Solución propuesta por la empresa SYSMA

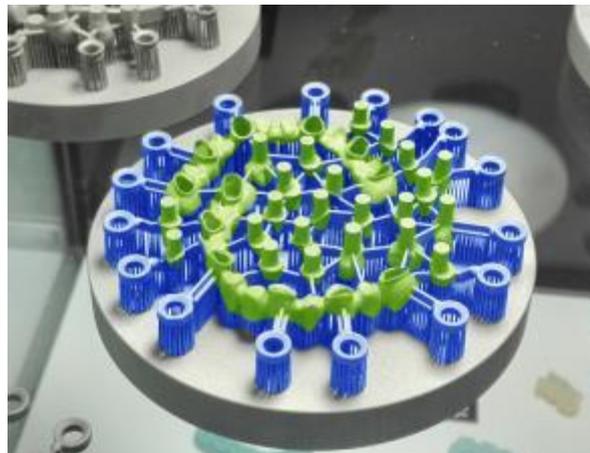


Figura 3. Sistema de anclaje (en azul) y posicionamiento de SYSMA

Tras analizar su solución se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Utiliza una placa de fabricación reutilizable con un espesor mínimo de unos 10mm.
2. El sistema de anclaje y posicionamiento al centro de mecanizado se fabrica cada vez mediante SLM lo cual limita mucho el espacio realmente utilizable para fabricar piezas.
3. El sistema necesita mucha geometría adicional de sacrificio para poder garantizar suficiente rigidez para poder mecanizar las piezas posteriormente en el CNC.
4. Antes de mecanizar, obliga a realizar la eliminación del soporte para que la geometría a mecanizar se pueda montar en el útil de fijación/posicionamiento al CNC, finalmente las piezas a mecanizar se montan sobre el útil diseñado.

La solución propuesta por la empresa RENISHAW está también ideada para poder mecanizar por ambos lados una pieza fabricada por fabricación aditiva. El sistema propuesto por RENISHAW se esquematiza en la figura 4 donde se puede dividir la geometría fabricada en

tecnología aditiva en dos partes claramente delimitadas, la coloreada que representaría la geometría de sacrificio necesaria para posicionar el conjunto a un CNC y las partes no coloreadas que simbolizarían las piezas fabricadas y sobre las cuales se pretende mecanizar zonas con alta precisión.

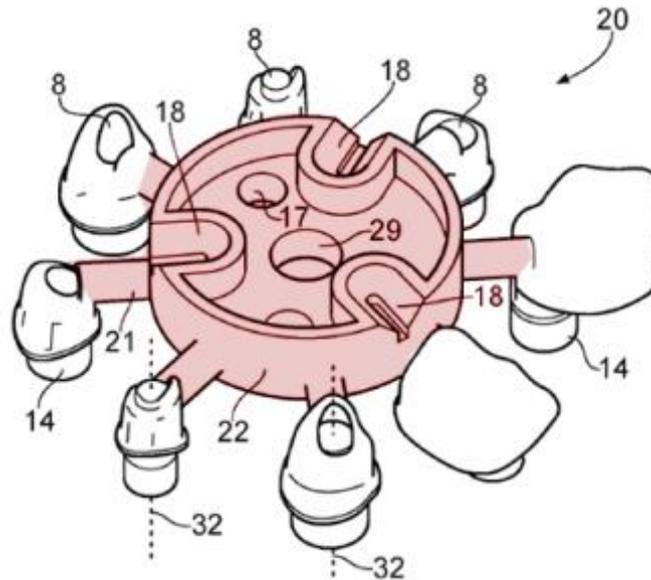


Figura 4. Sistema de RENISHAW propuesto para el mecanizado por ambos lados de piezas fabricadas por fabricación aditiva

Tras analizar su solución propuesta por RENISHAW se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Se fabrica cada vez mediante SLM el sistema de posicionamiento que además es de sacrificio, esta solución optimiza poco el material procesado ya que obliga a utilizar gran cantidad de material que solo servirá para garantizar el posicionamiento y posteriormente deberá ser eliminado.
2. La precisión del sistema está limitado a la precisión de la SLM y no a la precisión del CNC ya que la geometría que se fijará al CNC ha sido fabricada en SLM.
3. Se aprovecha poco el área de trabajo disponible en una tecnología de SLM ya que la mayor parte del área de trabajo se utiliza para fabricar el sistema de posicionamiento.

En conclusión, en la tarea 1.1. se ha estudiado las diferentes soluciones existentes en el mercado de modo que se concluye que la soluciones más adecuadas para poder mecanizar por un lado y por ambos lados son las soluciones propuestas por SYSMA 3D y RENISHAW, aunque la solución es mejorable desde varias perspectivas para que el sistema sea más competitivo pensando en un explotación industrial del sistema. El objetivo perseguido para obtener un sistema competitivo respecto a los expuestos sería:

- Uso de mínimo material de sacrificio.

- Maximización del área de trabajo para producir piezas.
- Generar una solución de amarre precisa que no se posicione respecto al material procesado por SLM sino a material fabricado por CNC.

Tarea 1.2. Estudio e identificación de los metales de mayor interés a nivel industrial por FA.

En sus inicios, las tecnologías de fabricación aditiva (FA) se utilizaron para producir prototipos de plástico y la gran mayoría de los procesos de FA (es decir, SLA, SLS, FDM, 3DP) han sido desarrollados para producir piezas con diversos plásticos. Después de un intenso desarrollo y exploración, las tecnologías de FA son capaces de procesar piezas complejas que se pueden utilizar directamente como partes funcionales, con diferentes materiales que incluyen metales, cerámicos y compuestos. La Tabla 1 enumera los tipos de materiales que pueden ser procesados por las tecnologías de FA y los procesos correspondientes. En este proyecto nos centraremos en los materiales metálicos que en la actualidad se están procesando por las tecnologías de FA.

Tabla 1. Materiales que se pueden procesar por las tecnologías de fabricación aditiva (FA) y sus procesos correspondientes¹

Material type		AM process(es)	Material(s)
Polymers ^{a)}	Thermo-setting	SLA, MJM	Photo-curable polymers
		MJM	Wax
	Thermo-plastic	SLS	Polyamide 12, GF polyamide, polystyrene
		FDM	ABS, PC-ABS, PC, ULTEM
		3DP	Acrylic plastics, wax
Metals ^{a)}	SLM	Stainless steel GP1, PH1 and 17-4, cobalt chrome MP1, titanium Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI and TiCP, IN718, maraging steel MS1, AlSi20Mg	
	LDM/LENS	Steel H13, 17-4 PH, PH 13-8 Mo, 304, 316 and 420, aluminum 4047, titanium TiCP, Ti-6-4, Ti-6-2-4-2 and Ti6-2-4-6, IN625, IN617, Cu-Ni alloy, cobalt satellite 21	
	EBM	Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI, cobalt chrome	
Ceramics ^{b)}	SLA	Suspension of Zirconia, silica, alumina, or other ceramic particles in liquid resin	
	FDM	Alumina, PZT, Si ₃ N ₄ , zirconia, silica, bioceramic	
	SLS	Alumina, silica, zirconia, ZrB ₂ , bioceramic, graphite, bioglass, and various sands	
	3DP	Zirconia, silica, alumina, Ti ₃ SiC ₂ , bioceramic, and various sands	
	Composites ^{b)}	Uniform composites	FDM
3DP			Polymer-matrix, metal-ceramic, ceramic-ceramic short fiber-reinforced composites
LOM			Polymer-matrix, ceramic-matrix, fiber and particulate-reinforced composites
FGM		SLS, SLM	Metal-metal, metal-ceramic, ceramic-ceramic, polymer-matrix, short fiber-reinforced composites
		LMD/LENS	CoCrMo/Ti6Al4V, TiC/Ti, Ti/TiO ₂ , Ti6Al4V/IN718
		FDM	PZT
	FEF	Al ₂ O ₃ /ZrO ₂	

Notes: a) Commercially available materials for AM processes; b) materials under research and development

Los metales se pueden procesar con técnicas de FA “indirectas”, mediante el uso de un aglutinante con el que se unen las partículas de metal y se obtiene una pieza en 3D, a la que debemos realizar un post-procesamiento para eliminar el aglutinante. También se pueden procesar con tecnologías FA “directas”, con las que se funden selectivamente las partículas metálicas para obtener la pieza final. Además, las piezas de metal se pueden obtener mediante el empleo de patrones de sacrificio fabricados por procesos de FA (llamados utillaje rápido) para fundición en arena o a la cera perdida. En la figura 5 se presenta una clasificación de los procesos de FA para metales.

¹ GUO, Nannan; LEU, Ming C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 8, no 3, 215-243.

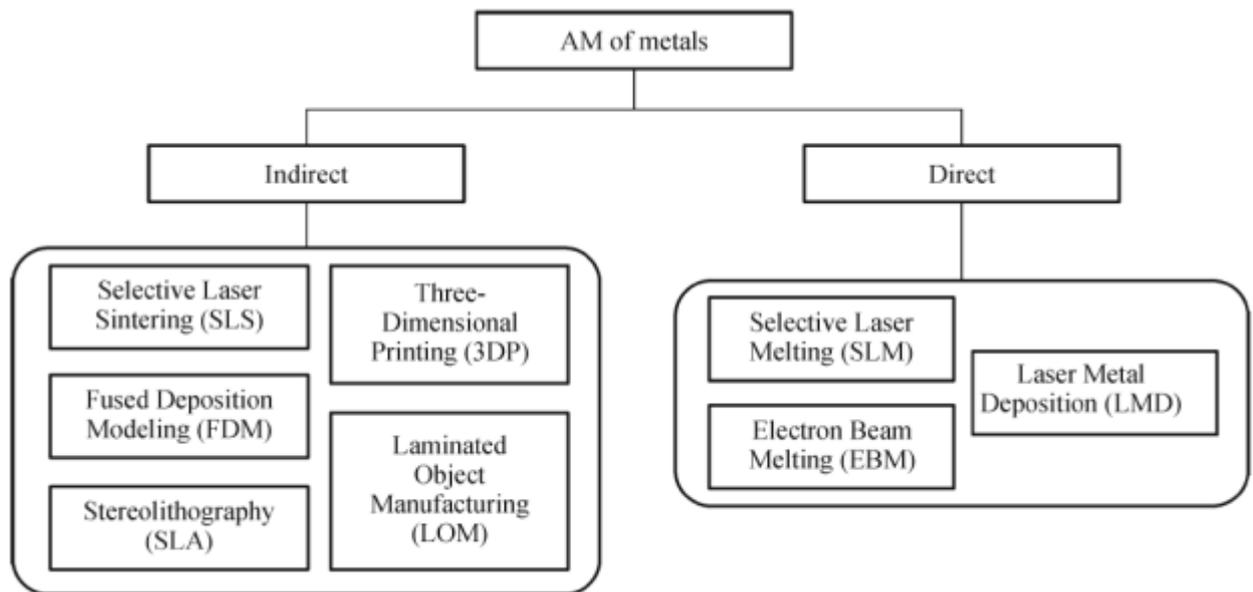


Figura 5. Clasificación de los procesos de FA para metales¹

Sectores y aplicaciones de la fabricación aditiva (FA) de metales

El desarrollo de técnicas de fabricación aditiva (FA) avanzadas e innovadoras ha progresado mucho en los últimos años haciendo que se amplíe cada vez más su uso en la industria. En comparación con la fabricación sustractiva, la FA es particularmente adecuada para la producción de pequeños volúmenes de producción, especialmente para piezas con geometrías complejas. Los procesos FA también ofrecen un gran potencial para la personalización, tal como la fabricación de implantes personalizados para los reemplazos de cadera y rodilla.

- **Aeroespacial**

Normalmente, los componentes aeroespaciales tienen geometrías complejas y, por lo general, están hechos de materiales avanzados, tales como aleaciones de titanio, superaleaciones base níquel, aceros especiales o cerámicas de ultra-alta temperatura, que son difíciles, costosos y consumen mucho tiempo de fabricar. Además, las series de producción aeroespaciales son generalmente pequeñas, limitadas a un máximo de varios miles de piezas. Por lo tanto, las tecnologías FA son muy adecuadas para aplicaciones aeroespaciales.

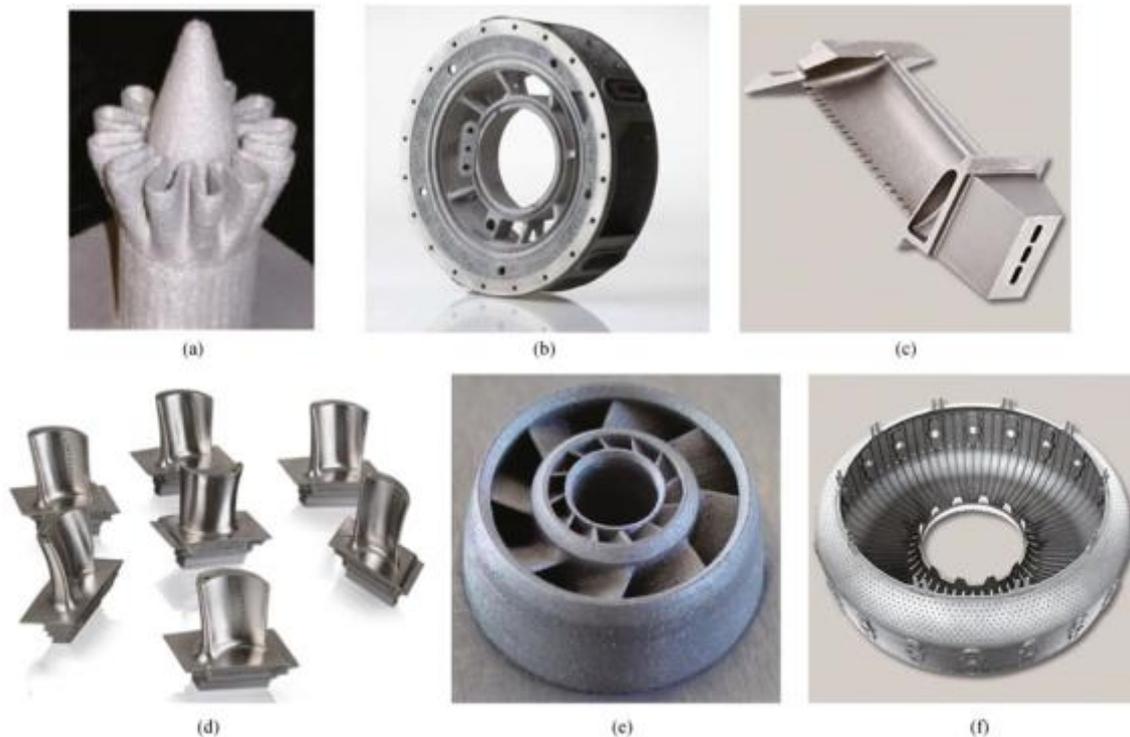


Figura 6. (a) Tobera de mezclado para el tubo de escape de la turbina de gas fabricada por LENS²; (b) carcasa soporte de compresor para motor de turbina de gas fabricado con EBM³; (c) Álabes de turbina con canales de refrigeración internos producidos por SLM⁴; (d) Álabes de turbinas fabricados por SLM⁵; (e) Álabes de turbina estática hueco fundido usando el molde y los núcleos fabricado por 3DP⁶; (f) carcasa de motor fabricada por SLM⁷

Además de fabricar directamente piezas funcionales para aplicaciones aeroespaciales, las técnicas de FA también se utilizan para reparar piezas de motores de las aeronaves con el fin de reducir el coste y extender la vida útil de las piezas tales como compresores, turbinas y cámaras de combustión, piezas de la carcasa y sus álabes.

- **Automoción**

El desarrollo de nuevos productos es crítico para la industria del automóvil, pero el desarrollo de un nuevo producto es a menudo un proceso muy costoso y consume mucho tiempo. La industria del automóvil ha estado utilizando las tecnologías FA como una herramienta importante en el diseño y desarrollo de componentes de automoción, ya que puede acortar el

² Optomec. <http://www.optomec.com/>

³ Arcam A B. <http://www.arcam.com>

⁴ Concept Laser Gmb H. <http://www.concept-laser.de/>

⁵ Morris Technologies. <http://www.morristech.com/>

⁶ Prometal R C T. <http://www.prometal-rct.com/>

⁷ Concept Laser Gmb H. <http://www.concept-laser.de/>

ciclo de desarrollo y reducir los costes de fabricación y de productos. También se han utilizado para hacer pequeñas cantidades de piezas estructurales y funcionales, tales como los escapes de motores, ejes de transmisión, componentes de la caja de engranajes para vehículos de alta gama y bajo volumen de producción. A diferencia de los vehículos de pasajeros, los vehículos de competición por lo general utilizan aleaciones ligeras (por ejemplo, titanio) y tienen estructuras muy complejas y bajos volúmenes de producción. Las empresas y los institutos de investigación también han aplicado con éxito las técnicas FA para la fabricación de componentes funcionales para vehículos de competición.

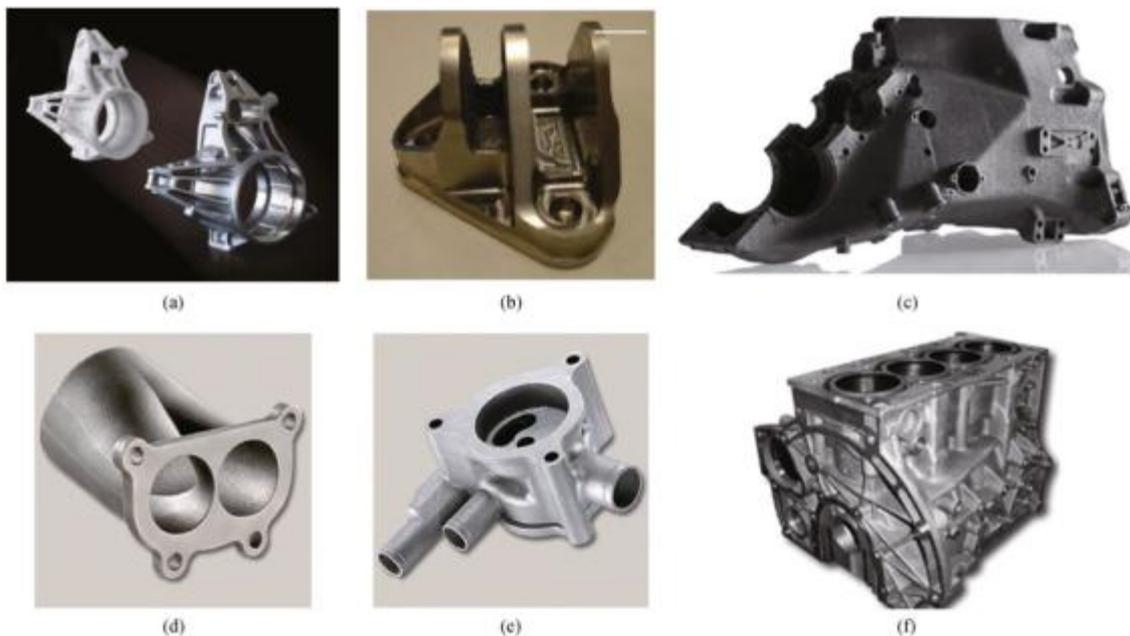


Figura 7. (a) Montante F1 (derecha de la imagen) fabricado a través de un proceso de fundición que utiliza patrones de poliestireno producidos por el SLS (izquierda)⁸; (b) suspensión soporte para Red Bull Racing, producida por LENS⁹; (c) caja de cambios de coche de carreras producida por EBM;¹⁰ (d) colector de escape producidos por SLM [22]; (e) bomba de aceite producida por SLM¹¹; (f) bloque del motor fundido usando molde y núcleos fabricados por 3DP¹²

Además de la fabricación directa de piezas funcionales, se ha estudiado ampliamente el utillaje rápido¹³ y se aplica en las industrias de automoción desde hace unos años.

- **Biomedicina**

⁸ Technology CRP. <http://www.crptechnology.com>

⁹ Optomec. <http://www.optomec.com/>

¹⁰ Arcam A B. <http://www.arcam.com>

¹¹ Concept Laser Gmb H. <http://www.concept-laser.de/>

¹² Prometal R C T. <http://www.prometal-rct.com/>

¹³ Rosochowski A, Matuszak A. Rapid tooling: the state of the art. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 106(1-3): 191-198

Las tecnologías de FA también se están utilizando en el campo biomédico para productos tales como implantes ortopédicos, estructuras reticulares de tejidos, órganos artificiales, dispositivos médicos, redes micro-vasculares y chips biológicos (producidos por células de impresión/modelado y proteínas¹⁴).

Muchas empresas, institutos de investigación y universidades están explorando formas de aplicar las tecnologías FA en la fabricación de implantes ortopédicos y dentales, lo que beneficia significativamente la fabricación de geometrías y estructuras complejas para hacer rugosa la superficie y obtener una integración ósea más eficaz, y para permitir que los implantes se puedan personalizar y satisfacer las necesidades individuales de cada paciente. Arcam ha aplicado su tecnología EBM para la fabricación de una amplia gama de tipos de implantes, tales como copas acetabulares, caderas, rodillas, hombros e implantes espinales, y un número de implantes han sido certificados en el mercado.

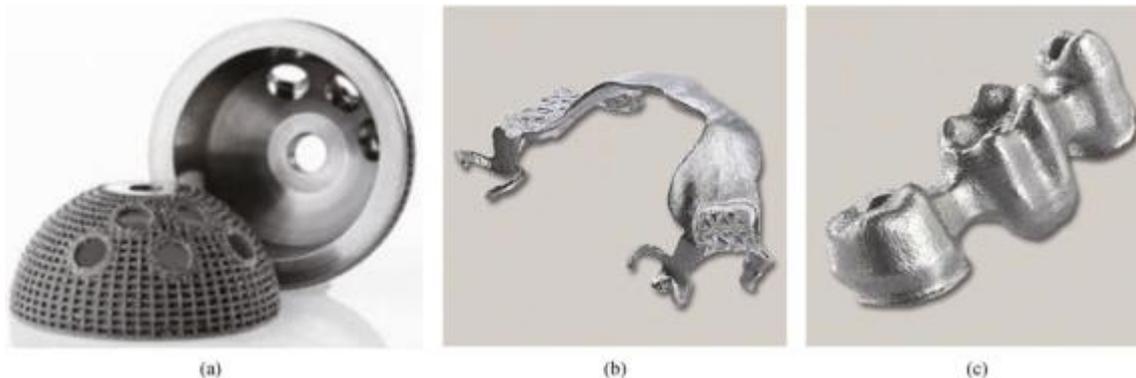


Figura 8. (a) Copas acetabulares con porosidad diseñada (material: Ti6Al4V) fabricados con EBM¹⁵; (b) prótesis dental (material: Ti6Al4V) fabricadas con SLM¹⁶; (c) puente dental de 3 unidades (material: CL111 CoCr) fabricado con SLM¹⁷.

¹⁴ Chang R, Emami K, Wu H, Sun W. Biofabrication of a threedimensional liver micro-organ as an in vitro drug metabolism model. *Biofabrication*, 2010, 2(4): 045004

¹⁵ Arcam A B. <http://www.arcam.com>

¹⁶ Concept Laser Gmb H. <http://www.concept-laser.de/>

¹⁷ Concept Laser Gmb H. <http://www.concept-laser.de/>



Figura 9. a) vástagos de cadera con malla, agujero y configuraciones sólidas fabricados utilizando EBM¹⁸ (b) vástagos de cadera funcionales con porosidad diseñada (sin porosidad, <2% en volumen de porosidad y 20% en volumen de porosidad) fabricado usando LENS¹⁹

- **Energía**

Las energías renovables (por ejemplo, la energía solar, la energía eólica) y las energías limpias (por ejemplo, la energía del hidrógeno) son soluciones prometedoras para reducir la carga ambiental y la dependencia de la energía fósil. Como uno de los dispositivos de energía “verdes”, las pilas combustible proporcionan grandes ventajas tales como alta eficiencia, alta densidad de potencia y bajas emisiones. Las aplicaciones potenciales incluyen la fuente de alimentación portátil, sistema de automoción y el sistema de energía distribuida. Sin embargo, el alto coste y la baja durabilidad obstruyen la amplia aplicación de las pilas de combustible²⁰. Existen grandes oportunidades para que las tecnologías FA contribuyan en el sector de Energía, como por ejemplo a través del rápido desarrollo y fabricación de prototipos para reducir el coste y el plazo de entrega de la investigación y desarrollo de nuevos productos, y la exploración de nuevos diseños para mejorar la eficiencia energética y la densidad de potencia.

¹⁸ Harrysson O, Cansizoglu O, Marcellin-Little D J, Cormier D R, West H A II. Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology. *Materials Science and Engineering C*, 2008, 28(3): 366–373

¹⁹ Bandyopadhyay A, Krishna B V, Xue W, Bose S. Application of laser engineered net shaping (LENS) to manufacture porous and functionally graded structures for load bearing implants. *Journal of Materials Science. Materials in Medicine*, 2009, 20(S1 Suppl 1): 29–34

²⁰ U.S. Department of Energy. Future fuel cells R&D. <http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/fuelcells/>. Accessed in 2010

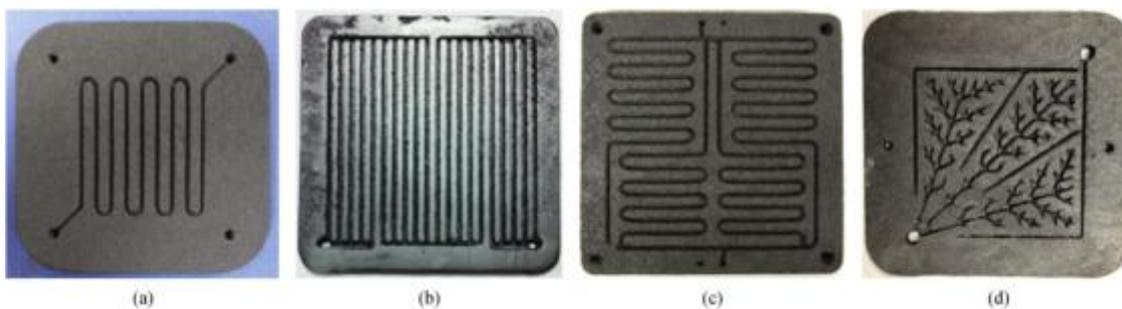


Figura 10. Placas bipolares de grafito para la pila de combustible PEM fabricadas por proceso SLS. El área activa es de 50 mm × 50 mm, la anchura del canal es de 1.5 mm y la profundidad es de 1.5 mm. (a) diseño serpentina; (b) Diseño de series en paralelo; (c) diseño de serpentina en serie; y (d) diseño “hoja” bioinspirado]²¹

En esta tarea se ha demostrado que gran diversidad de sectores industriales se están apoyando en la fabricación aditiva como procesos productivos para la fabricación de piezas metálicas con gran número de materiales como aceros, inconeles, Titanios, aleaciones base cobalto, Aluminios entre otros. Como común denominador cabe destacar que las aplicaciones industriales son muy diversas, aunque siempre se están enfocando hacia producciones de tirada corta y geometría compleja, además, en todos los casos se confirma que las piezas fabricadas forman parte de conjuntos más complejos por lo que requieren precisión localizada, por tanto, en todos los casos se ha de poder mecanizar las piezas fabricadas mediante sistemas optimizados que impliquen costes razonables y que aporten la suficiente precisión.

Tarea 1.3. Revisión bibliográfica que relacione las tensiones/deformaciones generadas por procesos de fusión/solidificación metálica

Las tensiones residuales son una consecuencia de las interacciones entre el tiempo, la temperatura, la deformación y la microestructura (Figura 19). El material o las características relacionadas con el material que influyen en el desarrollo de tensiones residuales son: la conductividad térmica, la capacidad calorífica, el coeficiente de dilatación térmica, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, la plasticidad, la termodinámica y la cinética de las transformaciones, los mecanismos de transformaciones y la plasticidad de transformación.

Se pueden hacer elucubraciones generales sobre el papel de los factores de los materiales en la evolución de las tensiones residuales. Por ejemplo, las variaciones espaciales de temperatura dan lugar a deformaciones térmicas no uniformes, el efecto aumenta cuando el material es rígido y tiene un alto límite elástico, sin embargo, una alta conductividad térmica ayuda a reducir las tensiones residuales mediante la reducción de los gradientes de temperatura.

²¹ Guo N, Leu M C. Experimental study of polymer electrolyte membrane fuel cells using a graphite composite bipolar plate fabricated by selective laser sintering. In: Proceeding of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 2012

La disipación o absorción de calor depende del medio ambiente externo del componente y del calor generado internamente, por ejemplo, durante la deformación adiabática o debido al calor latente de transformación. Del mismo modo, la distribución de la deformación plástica en un componente depende de las propiedades constitutivas y de cómo las deformaciones de conformado debido a las transformaciones de fase se compensan para el desarrollo de tensiones. Las propiedades fundamentales de los materiales dependen de la temperatura. La Tabla 3 muestra cómo varían las propiedades fundamentales con la temperatura. Algunas de estas propiedades se pueden estimar cuantitativamente y otras, tales como el módulo elástico y la conductividad térmica, todavía se tienen que medir para cada aleación.

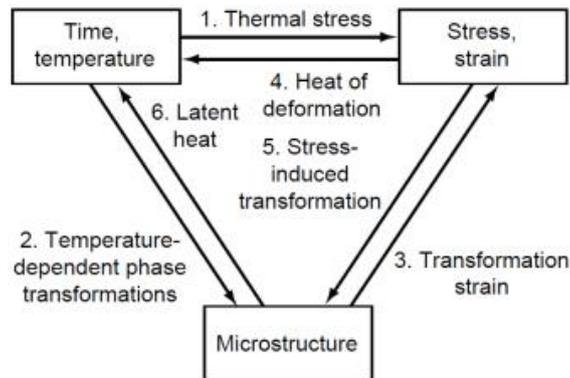


Figura 11. Relación entre la temperatura, las tensiones y la microestructura²²

²² T. Inoue and Z. Wang, Mater. Sci. Technol., Vol 1, 1985, p 845–850

Tabla 2. Propiedades físicas que afectan el desarrollo de las tensiones residuales en aceros²³

Property	Phase(a)	Temperature, °C (°F)			
		0 (32)	300 (570)	600 (1110)	800 (1470)
Elastic modulus, GPa	γ	200	175	150	124
	$\alpha + P$	210	193	165	120
	α_b	210	193	165	120
	α'	200	185	168	...
Poisson ratio	γ	0.291	0.309	0.327	0.345
	$\alpha + P$	0.280	0.296	0.310	0.325
	α_b	0.280	0.296	0.310	0.325
	α'	0.280	0.296	0.310	...
Thermal expansivity, K^{-1}	γ		2.1×10^{-5}		
	$\alpha + P$		1.4×10^{-5}		
	α_b		1.4×10^{-5}		
	α'		1.3×10^{-5}		
Thermal conductivity, $W/m \cdot K$	γ	15.0	18.0	21.7	25.1
	$\alpha + P$	49.0	41.7	34.3	27.0
	α_b	49.0	41.7	34.3	27.0
	α'	43.1	36.7	30.1	...
Specific heat capacity, $10^{-6} J/m^3 \cdot K$	γ	4.15	4.40	4.67	4.90
	$\alpha + P$	3.78	4.46	5.09	5.74
	α_b	3.78	4.46	5.09	5.74
	α'	3.76	4.45	5.07	...
Yield strength, MPa	γ	190	110	30	20
	$\alpha + P$	360	230	140	30
	α_b	440	330	140	30
	α'	1600	1480	1260	...

(a) α , P, α_b , and α' represent allotriomorphic ferrite, pearlite, bainite, and martensite, respectively. Source: Ref 3

Todos los procesos de fabricación introducen tensiones residuales en piezas mecánicas, lo que influye en su comportamiento a fatiga, resistencia a fractura e incluso en su resistencia a la corrosión. Existen pocos métodos de transformación/procesado de metales que no producen nuevas tensiones. Por tanto, el papel de las tensiones residuales es muy importante en el diseño de piezas mecánicas.

Las tensiones residuales se definen generalmente como la tensión que permanece en piezas mecánicas que no están sometidas a tensiones externas. Las tensiones residuales existen en prácticamente todas las piezas rígidas, ya sean metálicas o no (madera, polímero, vidrio, cerámica, etc.). Es el resultado de la historia metalúrgica y mecánica de cada punto en una pieza y la pieza en su conjunto durante su fabricación.

La eliminación completa de las tensiones residuales puede no ser posible. Sin embargo, siguiendo técnicas de fabricación apropiadas, pueden ser mitigadas en gran medida. Por lo tanto, el conocimiento de los factores que influyen en el estado de las tensiones residuales es muy importante para la gestión de las tensiones residuales.

²³ R. Schröder, Mater. Sci. Technol., Vol 1, 1985, p 754–764

Orígenes de las tensiones residuales

En general, se puede inducir en una pieza tensiones residuales macroscópicas debido a:

- Flujo plástico heterogéneo la acción de un tratamiento externo (granallado, pulido, granallado, tratamiento con láser)
- Deformación plástica heterogénea durante un calentamiento o enfriamiento no uniforme (temple convencional, moldeo de plásticos)
- Deformación estructural desde los procesos de transformación (tratamiento térmico)
- Heterogeneidad de orden químico o cristalográfico (nitruración o cementación)
- Diversos tratamientos superficiales (esmalado, niquelado, cromado, PVD y CVD)
- Las diferencias en los coeficientes de expansión y la incompatibilidad mecánica de los diferentes componentes de materiales compuestos (materiales compuestos de matriz metálica e orgánica, recubrimientos cerámicos)

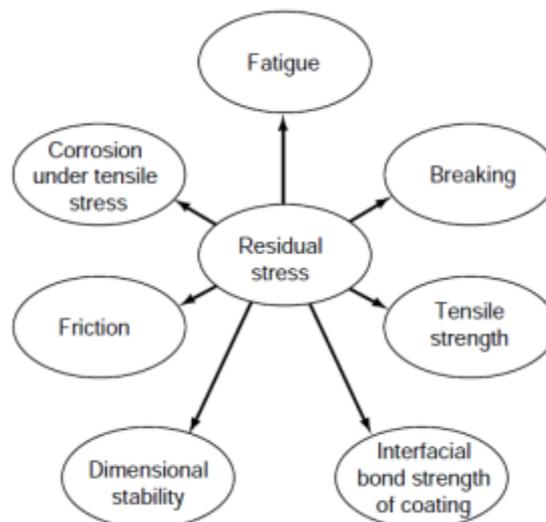


Figura 12. Efecto de las tensiones residuales en el rendimiento de los materiales [60]

Estrategias para disminuir o eliminar las tensiones residuales:

Las tensiones residuales se generan en los componentes estructurales durante los procesos de fabricación, tales como la forja, mecanizado, tratamiento térmico, granallado y muchos otros. Estas tensiones son siempre una consecuencia de los cambios dimensionales distribuidos heterogéneamente debido a deformaciones plásticas heterogéneas, tratamientos termoquímicos y/o transformaciones de fase. Las tensiones residuales pueden ser beneficiosas o perjudiciales para el comportamiento de piezas en servicio, dependiendo del estado de los materiales, así como el signo, la magnitud y estabilidad de las tensiones residuales, la carga mecánica y las condiciones ambientales.

Las tensiones residuales se pueden ser reducir/mitigar mediante la aplicación de energía mecánica y/o térmica. Las técnicas más importantes conocidas para inducir el alivio de tensiones residuales son: Tratamiento térmico de alivio de tensiones (o recocido),

Deformación uniaxial (embutición, estiramiento) y la deformación cíclica²⁴. El alivio también puede ser causado por ciclo térmico, enfriamiento rápido (tratamiento de temple), bombardeo de neutrones, el efecto de campos magnéticos alternos (en el uso de ferromagnéticos) y vibración.

Tras la evaluación de estas tres alternativas para mitigar o reducir las tensiones residuales se concluye, que las deformaciones generadas por procesos de fabricación aditiva deberán ser cuantificadas y también atenuadas/eliminadas mediante el posicionamiento y orientación de las piezas, las estrategias de aporte energético para la fusión de los materiales, utilización de materiales con baja tendencia a la deformación y/o mediante los postratamientos térmicos que puedan ser aplicados durante la fabricación o mediante postprocesos.

PAQUETE DE TRABAJO 2. DESARROLLO DE SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ENTRE SLM Y MECANIZADO

El objetivo de este paquete de trabajo es realizar el diseño y la fabricación de un subsistema que relacione el proceso de fabricación aditiva mediante la tecnología SLM (Selective Laser Melting) con el mecanizado posterior, para poder mecanizar por ambos lados con precisión.

Los paquetes de trabajo 2 y 3 son similares puesto que las premisas de partida son las mismas, solamente cambia la tecnología de fabricación aditiva y difiere entre ellos el resultado dadas las características específicas de cada una de las tecnologías. En el paquete de trabajo 2 la tecnología de fabricación aditiva utilizada es la SLM (laser Melting) y en el paquete de trabajo 3 la tecnología es la EBM (Electron Beam Melting).

Las tareas desarrolladas han sido las siguientes:

Tarea 2.1. Estudio y definición de condiciones a cumplir por el sistema de posicionamiento entre SLM y mecanizado.

La tecnología SLM está preparada para poder fabricar piezas sobre una placa de acero inoxidable del tipo AISI 304 o AISI 316 de 20mm de espesor atornillada a la plataforma de la máquina, de modo que tras la fabricación, se separan las piezas de la placa mediante procesos de corte estándar como sierra de corte o mediante corte por hilo.

El objetivo de esta tarea es definir las condiciones que tiene que cumplir el sistema de posicionamiento para que se cumplan requisitos como son:

- Mecanizar cualquier parte de la geometría fabricada sin perder las referencias, generar el mínimo material de sacrificio posible
- Garantizar máxima precisión

²⁴ O. Vöhringer, in Residual Stresses: Generation—Measurement—Valuation, Vol 1, E. Macherauch and V. Hauk, Ed., DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, 1983, 49–83.

²⁵ M.R. James, in Advances in Surface Treatments, Vol 4, International Guidebook on Residual Stresses, A. Niku-Lari, Ed., Pergamon Press, Oxford, 1987, 349-365.

- Soportar las tensiones generadas por los materiales procesados ya que la cámara de trabajo no está calefactada lo cual implica que no existe un alivio de las tensiones que se generan mientras se procesa el metal.

Tras estudiar los sistemas existentes en el mercado para mecanizar piezas fabricadas previamente mediante tecnologías de fabricación aditiva de modo general, y habiendo analizado en detalle el sistema propuesto por SISMA 3D (paquete de trabajo 1), se ha definido una serie de condiciones que el sistema a desarrollar en este proyecto debe cumplir para que los objetivos queden satisfechos estableciendo un pliego de condiciones.

Pliego de condiciones para sistema de precisión para mecanización de piezas obtenidas por fabricación aditiva:

1. El sistema debe servir para mecanizar piezas fabricadas por TFA en metal por un solo lado y por ambos lados haciendo posible todos los mecanizados de las piezas fabricadas sin separar las piezas de la placa de fabricación.
2. El sistema debe garantizar la posición y orientación entre tecnología SLM y a un CNC de 5 ejes.
3. El sistema debe ser configurable para distintos tamaños de tecnologías de fabricación aditiva, de modo que sea utilizable en tecnologías de pequeño tamaño donde el área suele ser de 100*100mm a las máquinas de gran tamaño con área utilizable de hasta 500*500mm. En este caso el tamaño máximo de bandeja de fabricación para la SLM es de 250*250 mm.
4. Limitar mínimamente las zonas donde no se pueda mecanizar, de modo que se maximice la zona accesible por el CNC. Esta no es una condición absoluta sino relativa ya que se presupone que habrán zonas inaccesibles coincidiendo con los amarres al CNC.



Figura 13. Limitar las zonas no mecanizables

5. Minimizar la cantidad de material de sacrificio a un máximo orientativo del 25%. El material de sacrificio sirve para garantizar el amarre y posicionamiento entre la tecnología SLM y CNC. El sistema de SISMA 3D utiliza más de un 50% de material procesado a material de sacrificio.
6. Maximizar el área de fabricación utilizable al 90%. El sistema de SISMA 3D solo es capaz de utilizar el 60% del área de la placa de fabricación. La figura siguiente muestra

En verde representa el área máxima de utilización para fabricación de piezas con el sistema de SISMA 3D (izquierda) y el sistema propuesto en el proyecto PRECION FA (derecha).

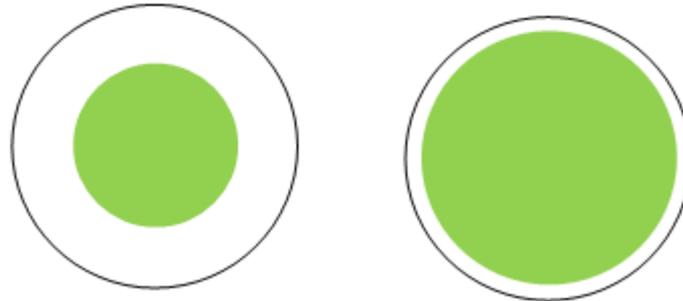


Figura 14. Diferencia gráfica entre áreas de fabricación de ambos sistemas

7. El sistema debe estar diseñado para que las tensiones derivadas del proceso SLM no generen deformaciones permanentes en las piezas.
8. Debe poder fabricar el sistema en varias placas de fabricación simultáneamente, para que posteriormente, se puedan mecanizar cada una de dichas placas de manera individual en función de la conveniencia.
9. El sistema debe ser compatible con el procesado de diferentes materiales tales como: Ni, Al, Aceros, Ti, etc.

Tarea 2.2. Diseño de sistema de posicionamiento entre SLM y mecanizado.

En esta tarea se ha desarrollado el diseño en detalle del sistema, especificando componentes, materiales y tolerancias de fabricación necesarias para la fabricación. El sistema ha sido modelado en un sistema CAD 3D.



Figura 15. Ejemplo de piezas que pueden ser fabricadas con TFA

Las TFA necesitan de un sustrato ya sea placa o soporte sobre el cual se iniciará la fabricación de las piezas y será el soporte de las mismas una vez finalizada la fabricación. Partiendo de

esta premisa, el sistema de posicionamiento entre SLM y sistema de mecanizado CNC, se cimienta sobre el diseño dicha placa como elemento clave.

Para cumplir las condiciones anteriormente descritas en la tarea 2.1, se ha desarrollado un sistema modular de placas. Para llegar a una solución óptima se han realizado diversos diseños preliminares hasta que se ha obtenido el diseño conceptual que responde con las premisas indicadas.

Tarea 2.3. Fabricación de prototipo funcional de sistema de posicionamiento entre SLM y mecanizado.

El sistema diseñado en la tarea previa se ha fabricado finalmente ajustándolo a la tecnología se SLM disponible en AIDIMME, en concreto la tecnología Laser Cusing y con la máquina modelo M3. El objetivo principal es validar el diseño del sistema de posicionamiento entre la tecnología SLM y el mecanizado en CNC. Encima del sistema se han fabricado los testers para la validación del sistema que se ha desarrollado en el paquete de trabajo 5.

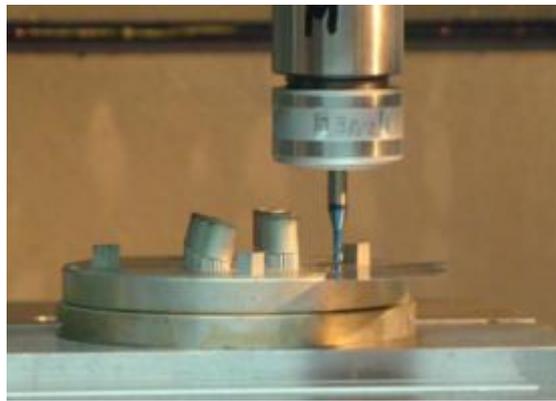


Figura 16. Mecanizado de las piezas testers

PAQUETE DE TRABAJO 3. DESARROLLO DE SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ENTRE EBM Y MECANIZADO

El objetivo de este paquete de trabajo es el mismo que en el paquete de trabajo 2 pero para realizar el diseño y la fabricación de un subsistema que relacione el proceso de fabricación aditiva mediante la tecnología EBM (Electron Beam Melting) con el mecanizado posterior, para poder mecanizar por ambos lados con precisión.

Se han desarrollado tres actividades para la consecución del objetivo de este paquete de trabajo.

Tarea 3.1. Estudio y definición de condiciones a cumplir por el sistema de posicionamiento entre EBM y mecanizado.

La tecnología EBM tiene una serie de particularidades que hacen claramente diferente el sistema de posicionamiento necesario para poder fabricar piezas sobre una placa metálica y posteriormente mecanizarlas con precisión. Las diferencias son que la placa de fabricación estándar de la tecnología esta posicionada sobre un manto de polvo del material a procesar, en esta tecnología la placa de fabricación no está fijada solidariamente a la máquina, y que el

sistema debe ser compatible con un entorno el cual se calienta a temperaturas cercanas a los 700°C para el procesamiento de Ti64 o incluso más para otros materiales como los base Cobalto o base Níquel.

La tecnología EBM está preparada para poder fabricar piezas sobre una placa de acero inoxidable, del tipo AISI 304 o AISI 316 de 12 a 20mm de espesor, que se sitúa sobre una cama de polvo del material que se va a utilizar para la fabricación. Siguiendo una serie de procedimientos manuales/mecánicos, se corrige la posición de la placa para definir su ubicación con respecto al centro del haz de electrones, así como de su planitud con respecto al plano de fabricación, este proceso de calibración no tiene como objetivo ser preciso por ello es razonable que la precisión sea de varios milímetros, muy lejos de la precisión que se está buscando. Una vez se define la ubicación de la placa de fabricación, ya se puede comenzar a fabricar sobre ella. En el proceso de fabricación actual, la placa de fabricación que se utiliza es de un material diferente al utilizado para la fabricación de las piezas, precisamente para conseguir que los diferentes coeficientes de dilatación de estos materiales, permitan una vez terminada la fabricación, las tensiones a cizalladura que se producen entre la placa y los soportes de las piezas, favorezcan una separación de las piezas de la placa sin necesidad de un proceso posterior de corte.

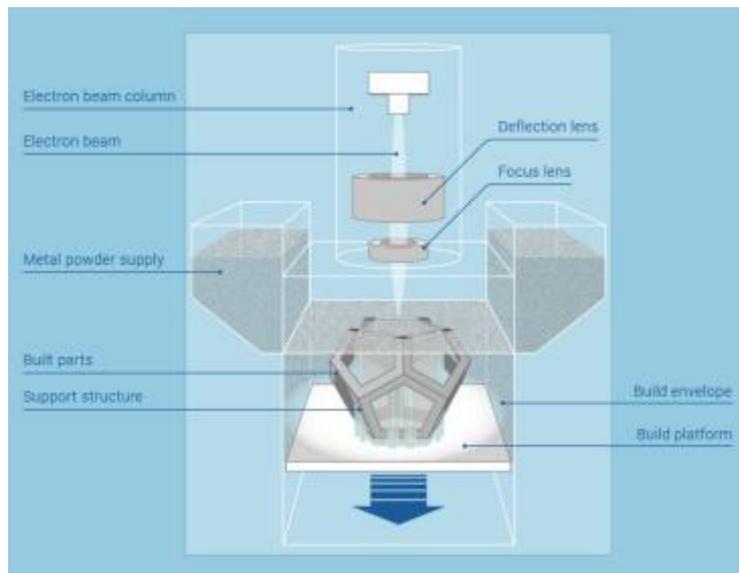


Figura 17. Infografía de la tecnología EBM

El objetivo de esta tarea era definir las condiciones que tiene que cumplir el sistema de posicionamiento para que se cumplan requisitos como son: Poder mecanizar cualquier parte de la geometría fabricada sin perder las referencias, generar el mínimo material de sacrificio posible y garantizar máxima precisión.

Tras estudiar los sistemas existentes en el mercado para mecanizar piezas fabricadas previamente mediante tecnologías de fabricación aditiva, se ha definido una serie de condiciones que el sistema a desarrollar en este proyecto debe poder cumplir para que los objetivos queden satisfechos. El pliego de condiciones establecido coincide con el desarrollado para la tecnología SLM y que está descrito anteriormente en la tarea 2.2.

Tarea 3.2. Diseño de sistema de posicionamiento entre EBM y mecanizado.

En esta tarea se procedió al diseño en detalle del sistema, especificando componentes, materiales y tolerancias de fabricación necesarias para la fabricación. El sistema se ha modelado en un sistema CAD 3D.

La tecnología EBM necesita de una placa soporte, sobre la cual se realiza la fabricación de las piezas, y esta misma placa podrá ser el soporte de las mismas una vez finalizada la fabricación. Para ello la placa de fabricación debe estar realizada en la misma aleación o similar a la que se pretende utilizar en el proceso de fabricación, siempre que tengan coeficientes térmicos de dilatación iguales. Ya que esto permitirá que cuando acabe la fabricación y se establezca la temperatura a condiciones ambientales en la cámara, no se generarán tensiones de cizalladura entre la placa y los soportes de las piezas, que puedan provocar el desprendimiento de las mismas.

En esta tarea se ha desarrollado una placa que satisface las necesidades planteadas previamente en el pliego de condiciones y adaptada a las características de la tecnología EBM.

Para garantizar la posición entre la EBM y el CNC, es necesario que exista una correlación entre ambas tecnologías. Esta correlación y repetitividad se consigue mediante los siguientes elementos dando la correlación en los tres ejes:

Tarea 3.3. Fabricación de prototipo funcional de sistema de posicionamiento entre EBM y mecanizado.

El objetivo de esta tarea era validar el diseño inicial del sistema de posicionamiento, entre la tecnología EBM y el proceso de mecanizado en CNC. Para ello se fabricaron unas placas soporte de fabricación en base a la definición planteada en la tarea 3.2. El material utilizado para su fabricación ha sido Titanio grado 5 (Ti6Al4V), ya que el demostrador, que se quiere fabricar mediante la EBM en la tarea posterior, también se va a fabricar en Titanio grado 5. El material de la placa debía corresponder a un material con un coeficiente de dilatación lo más similar posible al material existente. Para evitar que las tensiones producidas en la fabricación, durante la fase de enfriamiento posterior produjese esfuerzos de cizalladura que pudiesen separarlas.

Se han desarrollado diversos diseños, una vez realizada la fabricación del nuevo sistema de posicionamiento, se realizaron las pruebas pertinentes para la validación del sistema. Para ello, se utilizó una configuración de Pre-calentamiento diferente a la usada en las fabricaciones convencionales de la máquina EBM. Tras realizar diversas pruebas, donde se fueron ajustando los parámetros de fabricación, para adaptarlos a la tipología de fabricación que se pretendía hacer. Los resultados no fueron satisfactorios, ya que no se conseguía configurar de manera

adecuada los parámetros para realizar una fabricación. Debido a que los resultados obtenidos no permitieron poner en marcha la fase de fabricación.

Se volvió a replantear el diseño del sistema de posicionamiento. De manera que se utilizó el sistema de fabricación utilizado hasta la fecha, basado en una geometría de placa de fabricación similar a la que se utiliza normalmente en EBM pero introduciendo los mínimos cambios posibles para adaptarla a las premisas requeridas. Este nuevo planteamiento del sistema de posicionamiento permitió lanzar los procesos previos a la fabricación sin problemas, y así poder fabricar tanto los elementos auxiliares que permitirán posicionar el sistema con respecto a la pieza a mecanizar, como la pieza demostrador que se plantea en el paquete de trabajo siguiente.

PAQUETE DE TRABAJO 4. DESARROLLO DE PROCESO DE FABRICACION ADITIVA ORIENTADO A UN PROCESO DE MECANIZADO POSTERIOR

Los objetivos de este paquete de trabajo son:

- Definir la orientación y posición de la pieza en base a diferentes variables en el proceso de fabricación.
- Obtener el valor para el diseño de las creces, para las tecnologías SLM y EBM, basadas en dos variables, el error de posición en la fabricación + la rugosidad del material en la fabricación.
- Definir soportes/refuerzos que contrarresten las posibles tensiones generadas en la fabricación de las piezas
- Definir los tratamientos térmicos necesarios para aliviar tensiones en las piezas fabricadas según tecnología.
- Definición de las estrategias de mecanizado, referentes a la secuencia a limitaciones del CNC y zonas ciegas de mecanizado.
- Fabricación de dos demostradores donde poner en práctica los conocimientos adquiridos en el proyecto.

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

Tarea 4.1. Estudio y definición de condiciones de posición y orientación de piezas para ser fabricadas con SLM y EBM y posteriormente mecanizadas.

Siguiendo el flujo de trabajo en primer lugar se estudian las características de la placa base de trabajo, después de la fase de fabricación aditiva y finalmente de la fase de mecanizado.

Una vez definidas las peculiaridades del soporte y las fases de trabajo se estudian los objetivos del proceso productivo y se establecen unas pautas y comprobaciones que se deben realizar.

Definición de la placa base de trabajo para fabricación aditiva (Placa de fabricación):

La placa de fabricación que servirá para las fases de fabricación aditiva y mecanizado tiene forma de disco y sus dimensiones son de 85mm de diámetro y un espesor mínimo de 2mm,

estas dimensiones vienen condicionadas por la dimensión del brazo de la estación de mecanizado, respecto del espesor, se busca el valor mínimo que garantice la rigidez necesaria para la fabricación y posterior mecanizado pero de forma que se reduzca el coste de mecanizar en el caso que se necesite acceder a través del mismo hasta la pieza por la otra cara.

Para definir las limitaciones de fabricación y mecanizado se establece el origen y los ejes de coordenadas en la bandeja de fabricación que se muestran a continuación:

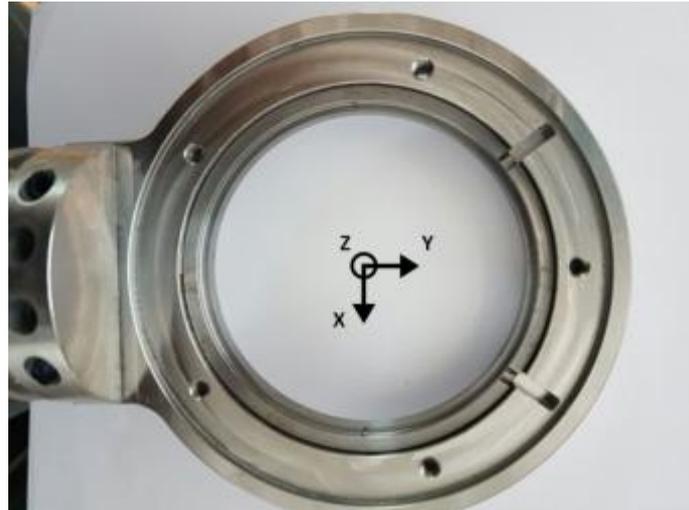


Figura 18. Vista en planta del brazo de mecanizado.

Limitaciones del proceso de fabricación aditiva

La fabricación aditiva tiene pocas limitaciones para producir geometrías complejas, las limitaciones que existen son:

1. Que la base de las piezas quepan en la placa de fabricación.
2. Espesores mínimos de 0.5mm.
3. Diámetro de canales largos y complejos 1mm.
4. Agujeros horizontales 0.8mm.
5. Para evitar los soportes, las superficies de las piezas tienen que formar un ángulo superior a 60º respecto al plano XY. Para superficies que formen un ángulo mayor a 45º y menor de 60º se recomienda poner soportes. En este último caso es una recomendación que puede obviarse a cambio de conseguir una superficie más rugosa.

El coste de las piezas que se fabrican por tecnologías de fabricación aditiva en metal depende de diferentes variables: Costes de máquina, RRHH, Materiales y los postprocesos que se tengan que aplicar para el cumplimiento del pliego de condiciones. Para que el coste sea el más bajo posible es fundamental realizar un rediseño de las piezas. Con estas premisas como punto de partida se rediseñan las piezas previo a la fabricación.



Figura 19. Premisas de diseño

Uno de los puntos clave a tener en consideración es que las partes de un piezas que se tengan que mecanizar deben ser las mínimas posibles, los costes pueden aumentar mucho en función de los mecanizados que se tengan que realizar, además, se tiene que tener en cuenta el posicionamiento y orientación en la fabricación aditiva ya que va a condicionar la posición y orientación en el centro de mecanizado, es básico además, considerarlo de inicio para que no hayan interferencias en las operaciones de mecanizado.

La posición de la pieza en la fabricación viene determinada por las condiciones expuestas, el eje mostrado en las figuras siguientes representa el eje Z de fabricación en fabricación aditiva. La pieza está especialmente diseñada para que no sea necesaria la utilización de soportes en su construcción minimizando costes de producción y de postprocesos.

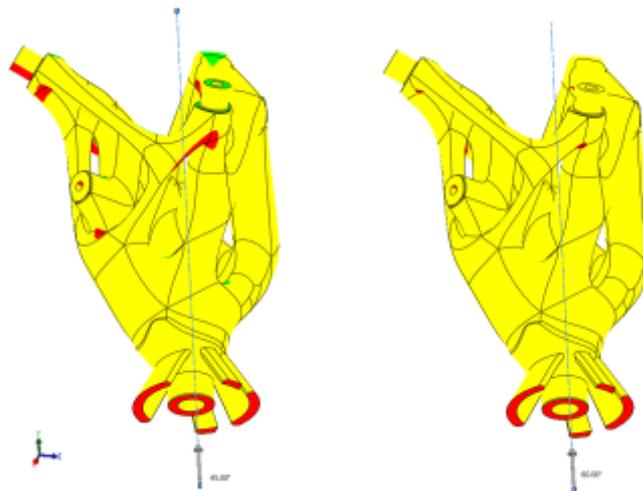


Figura 20. Las caras en color amarillo representan las superficies que se pueden fabricar sin soportes y las rojas aquellas que se recomienda soportar.

Las restricciones que presenta el proceso de mecanizado como tal son las que tienen que ver con la movilidad del brazo que puede girar libremente en su eje pero tiene un ángulo de desplazamiento de 120°.

A continuación se resume en una tabla todas las restricciones que condicionan la posición y la orientación de la pieza.

Tabla 3. Resumen restricciones.

		Máx (mm)	Mínimo (mm)	Observaciones
Ángulos en el plano	X Y	-	-	Sin limitaciones.
Dirección	Z	-	60° (respecto al plano xy)	Podría llegar hasta 45° con un empeoramiento notorio de la superficie resultante.
Diámetros en el plano	X Y	80mm	0,8	Para diámetros menores se recomienda mecanizar con posterioridad.
Diámetros en el eje	Z	-	1	Todos los diámetros muestran en la cara final superior una zona con un pequeño desprendimiento, si se requiere mejor calidad se recomienda reducir el diámetro mínimo 0.75mm para mecanizar con posterioridad.
Voladizos en el eje	Z	1	-	Todos los voladizos muestran un empeoramiento de la superficie, se recomienda diseñar chaflanes a 60° en todos los voladizos.
Voladizos Biapoyados	Z	2	-	
Espesores	X, Y, Z	Cualquiera	1	Espesores por debajo de este valor puede generar defectos.

Tarea 4.2. Estudio y definición de criterios de sobredimensionamiento de geometría en función de las variables existentes para posterior mecanizado.

Para la determinación de las creces necesarias a aplicar por cada tecnología de fabricación aditiva para posteriormente ser mecanizado, es necesario determinar por cada tecnología de fabricación aditiva:

1. **Error de posicionamiento** entre las tecnologías de fabricación aditiva y el centro de mecanizado.
2. **Espesor superficial en el que el material no es continuo** y por tanto, es eliminable para garantizar continuidad física del material.

Error de posicionamiento.

El error de posicionamiento ha sido determinado en el Paquete de trabajo 5. Como resumen, en la tabla siguiente se muestra el error de posicionamiento en cuatro medidas tomadas en la pieza demo. Cabe especificar que el error de posicionamiento en la pieza fabricada en

tecnología SLM no es fija, sino variable, es mayor cuanto más lejos se encuentra la zona a medir de la zona de amarre de la pieza. Este fenómeno se debe al tipo de material procesado en el proyecto que induce deformaciones en el proceso de fusión solidificación lo cual genera precipitados que su vez generan tensiones en la red cristalina y esas tensiones generan deformaciones permanentes durante la propia fabricación, por tanto, en el caso de la SLM las deformaciones generadas dependerán del tipo de material. Un material martensítico genera deformaciones como ha ocurrido con el 17-4 pH y los austeníticos Tipo AISI 316L las deformaciones deberían ser menores aunque no se ha medido en este proyecto.

		Desviación de la Posición			
		orif. 0	orif. 1	orif. 2	orif. 3
2	SLM PFA	0,12	0,18	0,33	0,64
4	EBM PFA	0,21	0,26	0,17	0,27

Tabla 4. Mediciones de desviaciones de posición de los orificios 0, 1, 2 y 3.

Espesor superficial en el que el material no es continuo

Espesor superficial en el que el material no es continuo se determina caracterizando secciones de las piezas fabricadas en las distintas tecnologías de fabricación aditiva.

Tecnología SLM:

Se tienen cuatro muestras en las que se identifica la zona de imperfección superficial y se toman medidas entre las zonas de valle y pico máximos.

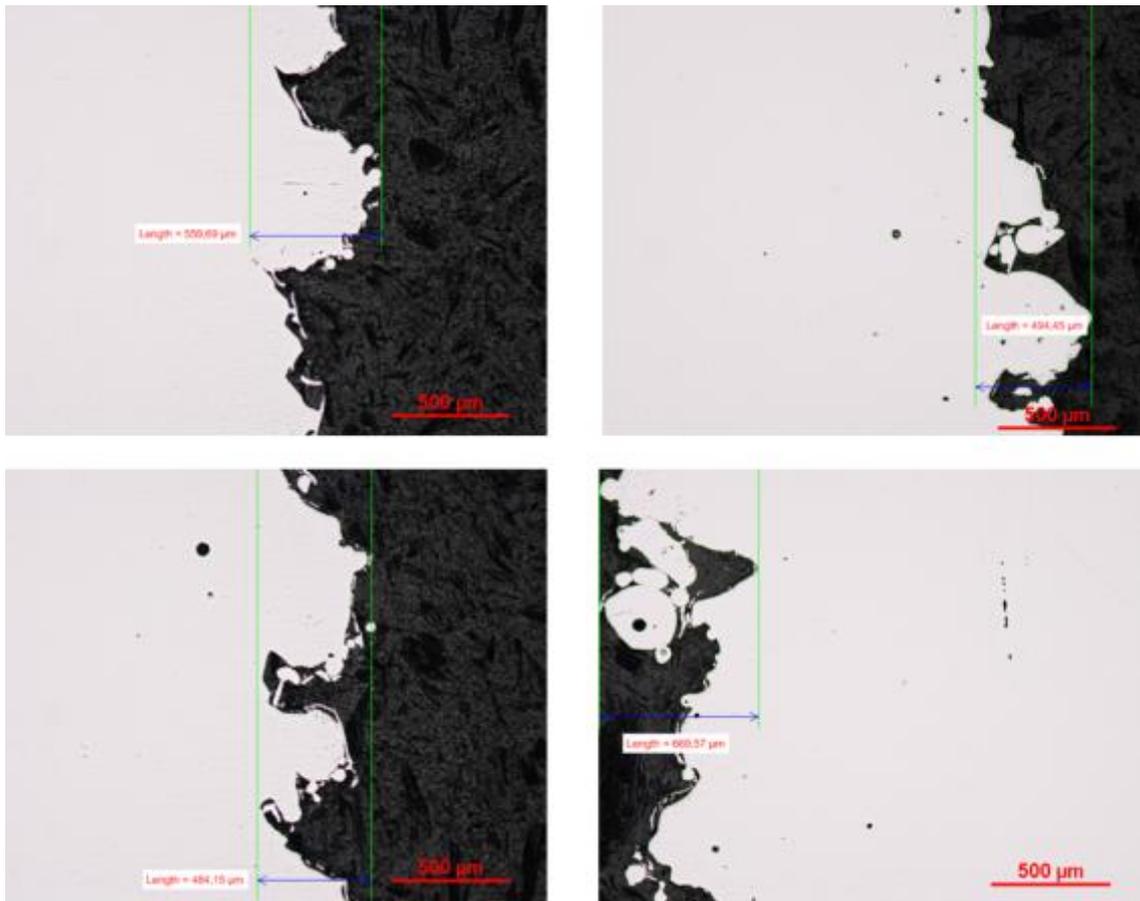


Figura 21. Medida de rugosidad en muestras fabricadas con tecnología SLM.

Se tiene un valor medio de 551,97 μm mientras que el valor máximo medido es de 669,57 μm , este último valor es que se va a tener en consideración para estar por la parte de la seguridad.

Tecnología EBM:

En este caso se dispone de tres muestras. De la misma forma se identifica la zona de imperfección superficial y se toman medidas entre las zonas de valle y pico máximos.

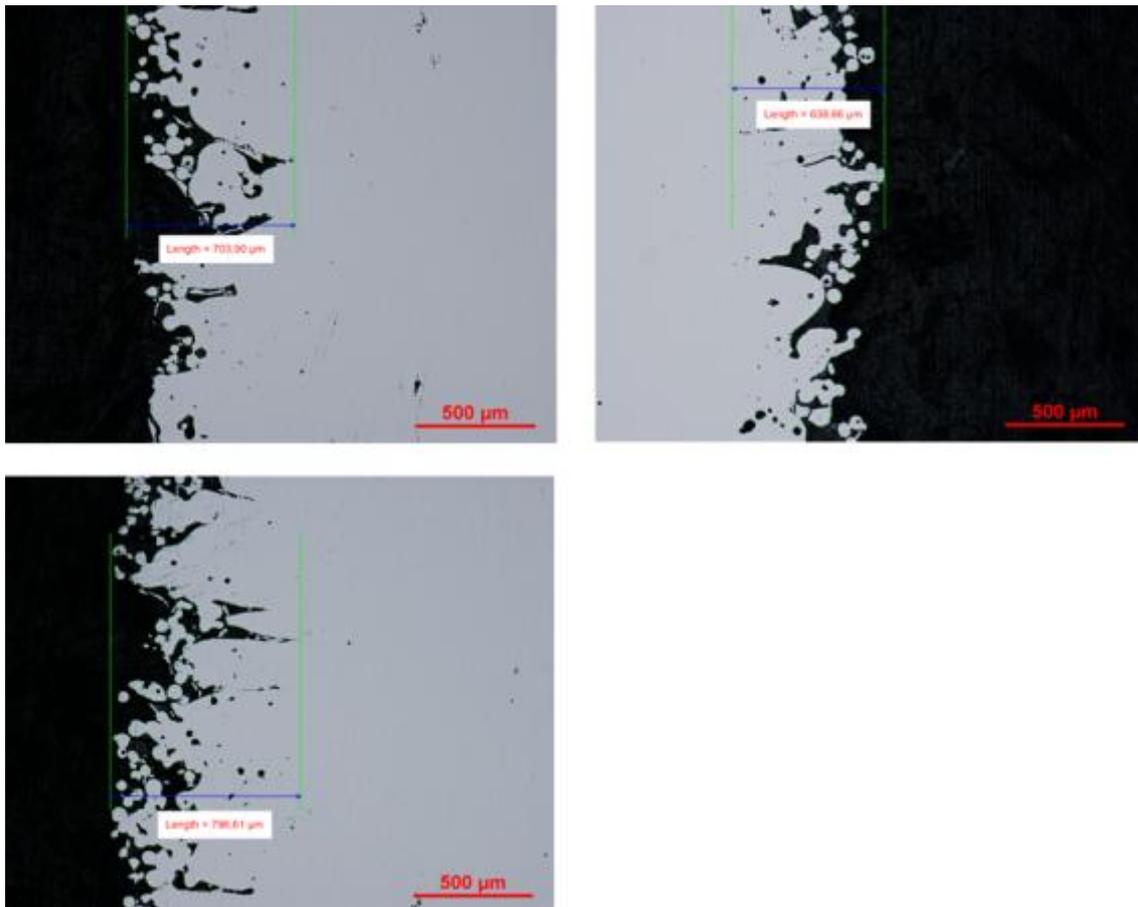


Figura 22. Medida de rugosidad en muestras fabricadas con tecnología EBM.

La medición da como resultado un **valor medio de 713,06 µm** y un **máximo de 796,61 µm**.

En vista de los resultados se puede ver que el acabado superficial de la tecnología de fabricación SLM presenta una superficie rugosa pero sin gradiente de material poco denso. En cambio en la tecnología EBM, por debajo de la rugosidad superficial, encontramos una zona con gran porosidad generada por un menor gradiente térmico, es decir, en el caso de la EBM, en la superficie de las piezas, aparecen partículas adheridas por fenómenos de sinterización los cuales generan un espesor mayor con material no continuo.

Para ambas tecnologías, el espesor de material no continuo habría que eliminarlo si se pretende disponer de un material resistente sin discontinuidades.

Finalmente se puede determinar que el sobre espesor a eliminar mediante procesos de mecanizado es el sumatorio entre **Error de posicionamiento** y **Espesor superficial en el que el material no es continuo**.

Sobredimensionamiento de geometría en función de las variables existentes para posterior mecanizado.

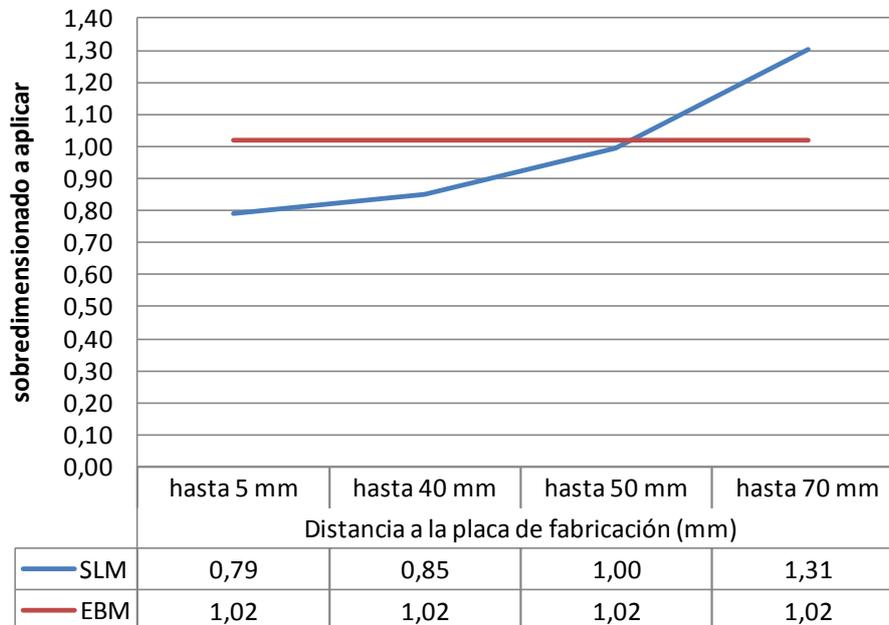


Figura 23. Sobredimensionamiento para EBM y SLM y posterior mecanizado.

Como conclusión de esta tarea cabría destacar que el sobre espesor a aplicar en Tecnología SLM dependería de la distancia a la que se encuentre la zona en cuestión respecto a la placa de fabricación, cuanto más alejada este la zona a mecanizar se requerirá un sobre espesor mayor para garantizar que se consigue tras la mecanización la eliminación completa de la rugosidad superficial. Cabe especificar que estos valores han sido registrados para el acero 17-4 PH que es un acero martensítico, para otros materiales procesados en SLM el resultado podría ser otro diferente ya que ello depende de las deformaciones que pudiera experimentar el material en su procesado con tecnologías aditivas.

En el caso de la tecnología EBM, el sobre espesor a aplicar es fijo de 1.02mm, que el valor calcula sea fijo es muy destacable ya que prevé un comportamiento muy predecible a la vez que razonable para las medidas de la geometría experimentada en el proyecto pero también para aplicarla en piezas de mayores dimensiones.

4.3. Estudio y definición de diseño de soportes y refuerzo necesarios para evitar deformaciones.

Con el objetivo de disminuir las deformaciones que se pueden provocar en el proceso de fabricación aditiva se pueden utilizar soportes o refuerzos y eliminarlos en una última fase de mecanizado.

Los dos mecanismos fundamentales de su cometido son ayudar a la disipación del calor que se genera durante el proceso de fusión de cada capa a la vez que rigidizan las geometrías para disminuir el nivel de tensiones a las que se ve sometida tanto en la fabricación como en el mecanizado.

Atendiendo a estas dos funciones se va a diferenciar entre dos tipos de elementos. Se llamará soportes a los elementos añadidos para disipar calor y refuerzos para referirse a los elementos que dan rigidez al conjunto y que se añaden a la pieza original.

SOPORTES

Con las tecnologías SLM y EBM la utilización de soportes es necesaria y su función para tecnologías de fabricación aditiva en metal es proporcionar una vía rápida de disipación térmica por conducción, los soportes se requieren en función de requisitos geométricos (tal y como se muestra en la tabla anterior donde se muestran las restricciones) en los que debidos a la propia geometría de la pieza a producir no existe material que cumpla esta función, por ello, hay que añadir dicho material denominado “soportes” para evitar que las temperaturas tan elevadas que se alcanzan durante la fusión puntual generada por un haz laser o un haz de electrones hagan que el material fundido rebase la temperatura de sublimación del mismo lo cual provocaría defectos importantes en las piezas. Cuando se funde capa a capa un metal, localmente se registran

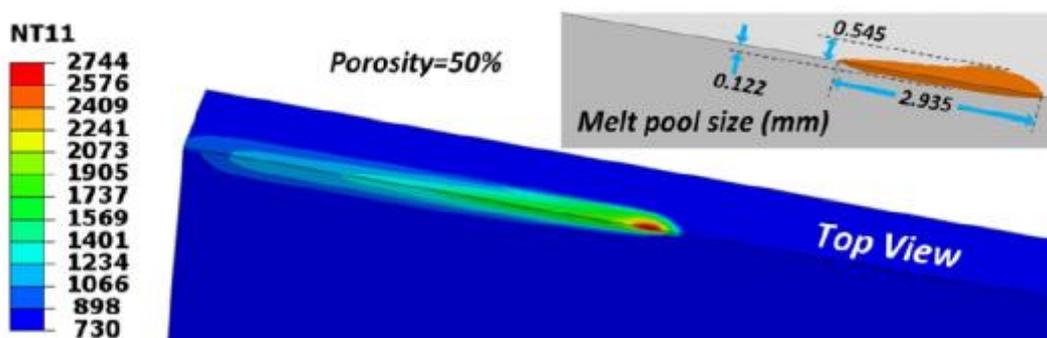


Figura 24. Temperatura simulada que se alcanza durante la fusión con tecnología EBM²⁶

Las temperaturas que se alcanzan son muy elevadas pero al ser tan puntuales, se pueden conseguir velocidades de enfriamiento muy elevadas.

REFUERZOS

Los refuerzos son geometrías adicionales que se van a diseñar y fabricar en la propia tecnología de fabricación aditiva con el objetivo que sean capaces de:

- Soportar los esfuerzos generados en el mecanizado.

²⁶ Bo Cheng, University of Alabama: On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation. DECEMBER 2014, Vol. 136 / 061018-7

- Geometría que sujeta la pieza fabricada a la placa de fabricación manteniendo las referencias durante todo el proceso de mecanizado.

Con el objetivo de optimizar los refuerzos se emplea un software de análisis y optimización. En él se pueden establecer zonas diseñables y las condiciones de carga o los requerimientos de desplazamiento. El software propone una geometría y en base a la propuesta se puede rediseñar la pieza y recalcular para comprobar que se cumplen los requisitos de carga.

Estas son las fases que se definen en la web del software utilizado:

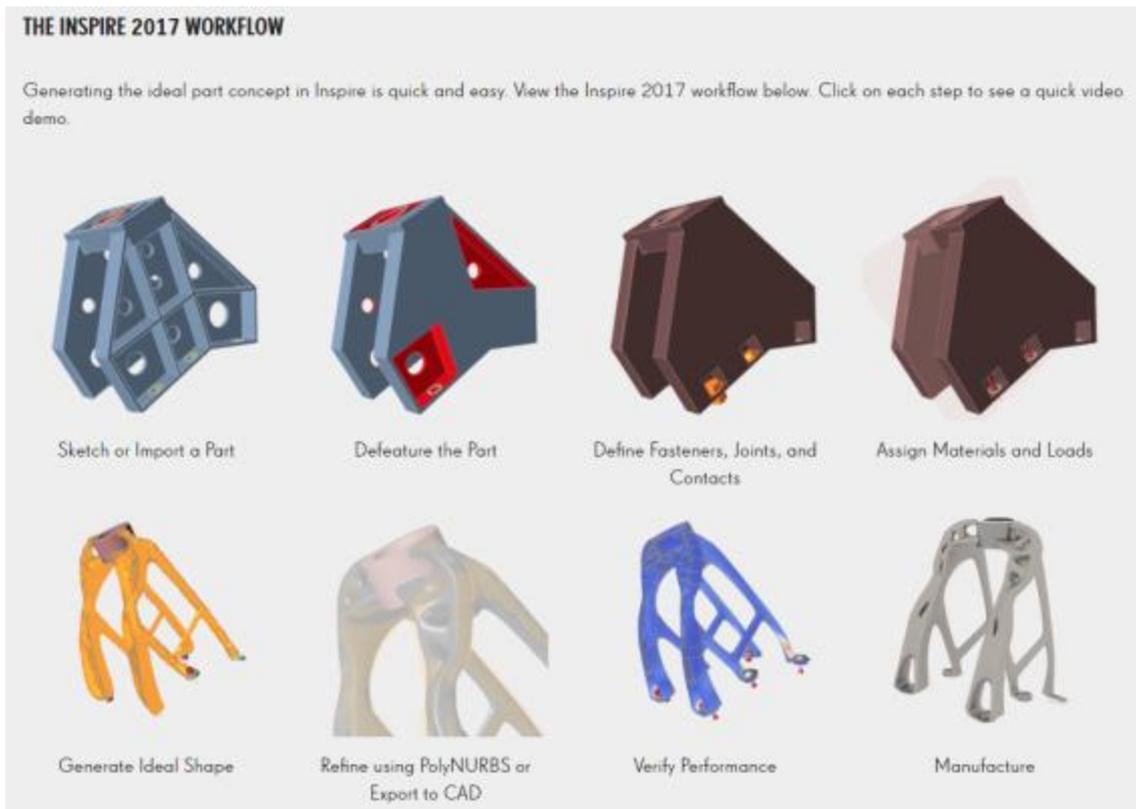


Figura 25. Fases del proceso de optimización²⁷

Definición de las cargas consideradas durante el mecanizado:

- Rectificado de caras:

Las caras de apoyo de las roscas se rectifican para eliminar los defectos superficiales, garantizar la planitud superficial y asegurar la perpendicularidad del agujero roscado.

Para el cálculo de la fuerza que se ejercerá sobre la pieza durante el proceso de rectificado hay que determinar los parámetros del mecanizado. Estos parámetros son el avance de la herramienta, la velocidad de corte, las características del material de la pieza y de la herramienta y el espesor medio de la viruta.

- Taladrado y Roscado:

²⁷ <http://www.solidthinking.com/Inspire2017.html>

Tanto en los extremos de los conductos como en los agujeros para sujeción se realiza un taladrado para preparar la superficie y el posterior roscado.

En el caso del taladrado la reacción que se considera sobre la pieza es un par que al igual que en el caso del rectificado dependerá del material tanto de la pieza como de la herramienta, de la velocidad de corte, del avance,...etc.

Una vez determinados y cuantificados los esfuerzos del mecanizado se prepara el modelo de cálculo con la pieza a fabricar, las cargas aplicadas y el sólido diseñable (de color marrón en la imagen) donde se pretende añadir los refuerzos optimizados por el software.

Al crear el volumen del cuerpo diseñable se ha delimitado una zona cercana al plato base para limitar el aporte de material, así mismo tampoco se limita el radio para que no sobresalga del perímetro de la pieza a fabricar y además tiene un ángulo interior de 60° para evitar cualquier problema en la fabricación.

Por otra parte, las restricciones de desplazamiento admisible en la fase de mecanizado son de 0.03mm.

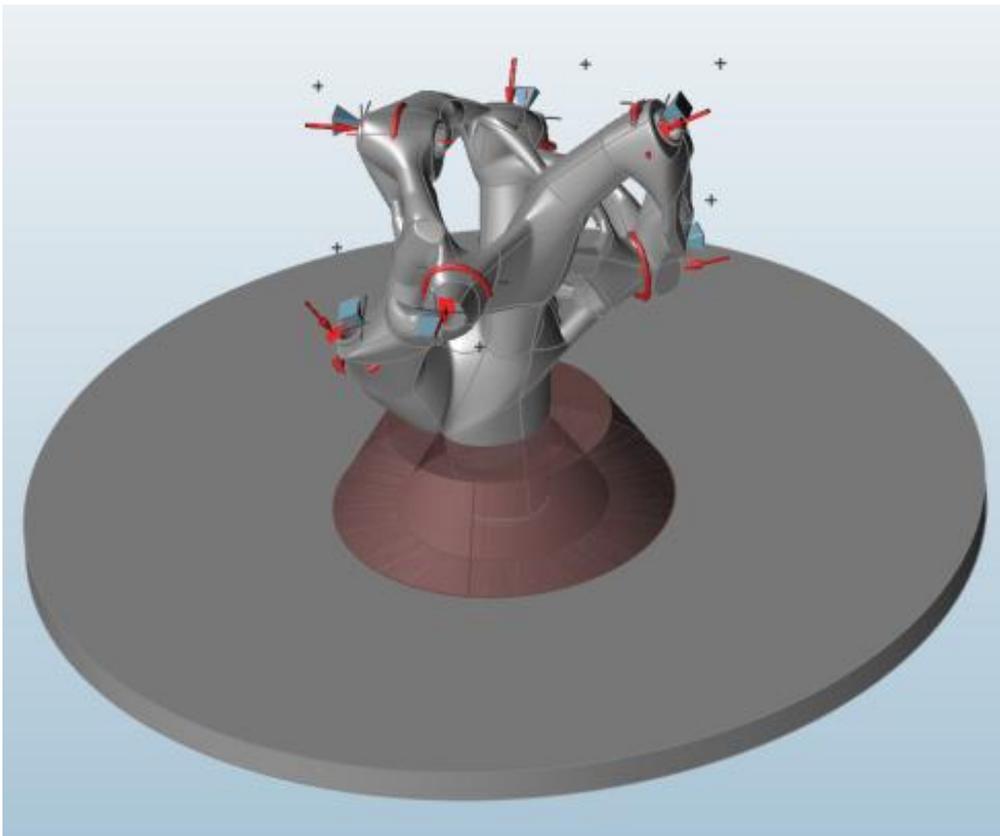


Figura 26. Modelo de optimización de refuerzos.

Como resultado de la optimización se obtiene la siguiente geometría:

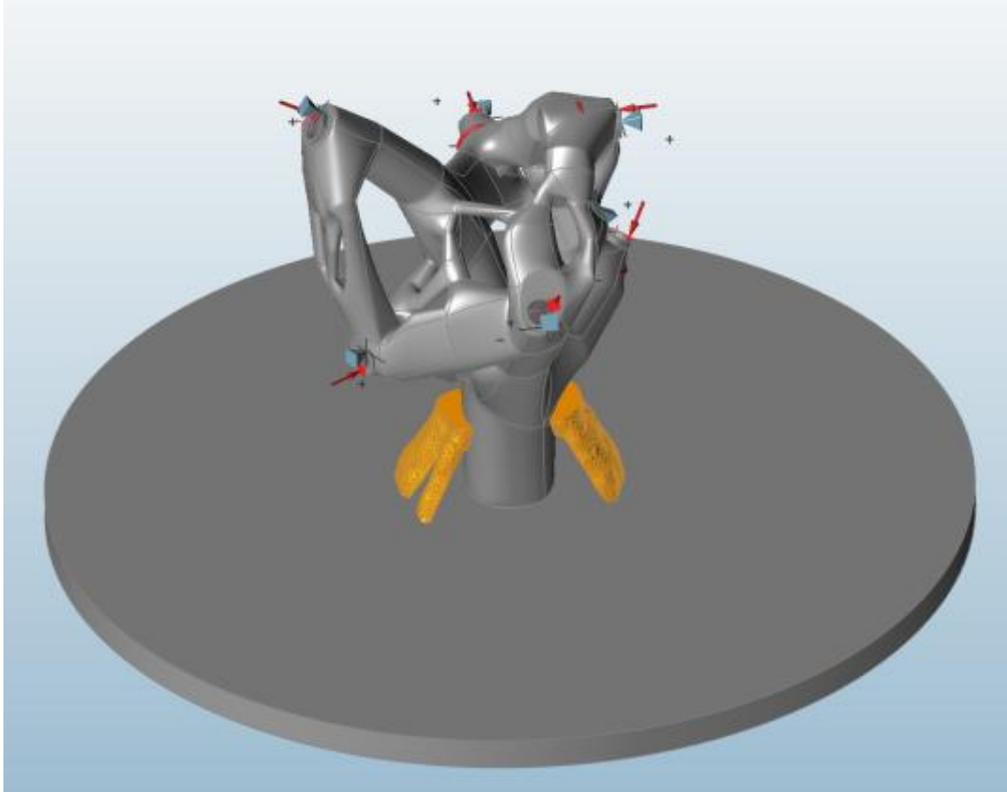


Figura 27. Resultado de la optimización.

Puesto que se trata de geometría auxiliar que se eliminará de la pieza no se considera la fase de refinado o rediseño y el posterior cálculo de verificación. Su función es soportar los esfuerzos que se generan durante el mecanizado.

Tarea 4.4 Definición y evaluación de los tratamientos térmicos aplicables.

Como ya se comentó en el paquete de trabajo 1, el origen de las tensiones residuales está en los procesos de fabricación de los materiales y en las condiciones de servicio que dan lugar a deformaciones no uniformes. Pueden ser deformaciones plásticas no uniformes de tal manera que el material está sometido a diferentes valores de deformación plástica en diferentes puntos. También pueden tratarse de deformaciones térmicas cuyo valor también varía para diferentes puntos. Cuando estas deformaciones se relajan se producen entonces las tensiones residuales.

Las tecnologías de fabricación aditiva se asemejan a los procesos de soldadura por fusión, en los que se supera la temperatura de “*liquidus*” del material base y del material de aportación. No obstante, este tipo de procesos requiere un aporte térmico importante que permita superar la temperatura de fusión de los materiales a unir. Este aporte de energía provoca un flujo de calor al material base.

En este proyecto se ha optado por procesar el acero inoxidable 17-4 PH de endurecimiento por precipitación en la tecnología SLM y realizar posteriormente el tratamiento térmico de alivio de tensiones con las muestras/piezas fijadas a la placa de fabricación.

El tratamiento térmico de alivio de tensiones para este tipo de acero se hace a 650 °C durante 1 y enfriamiento al aire según Luecke, W. E., & Slotwinski, J. A.²⁸

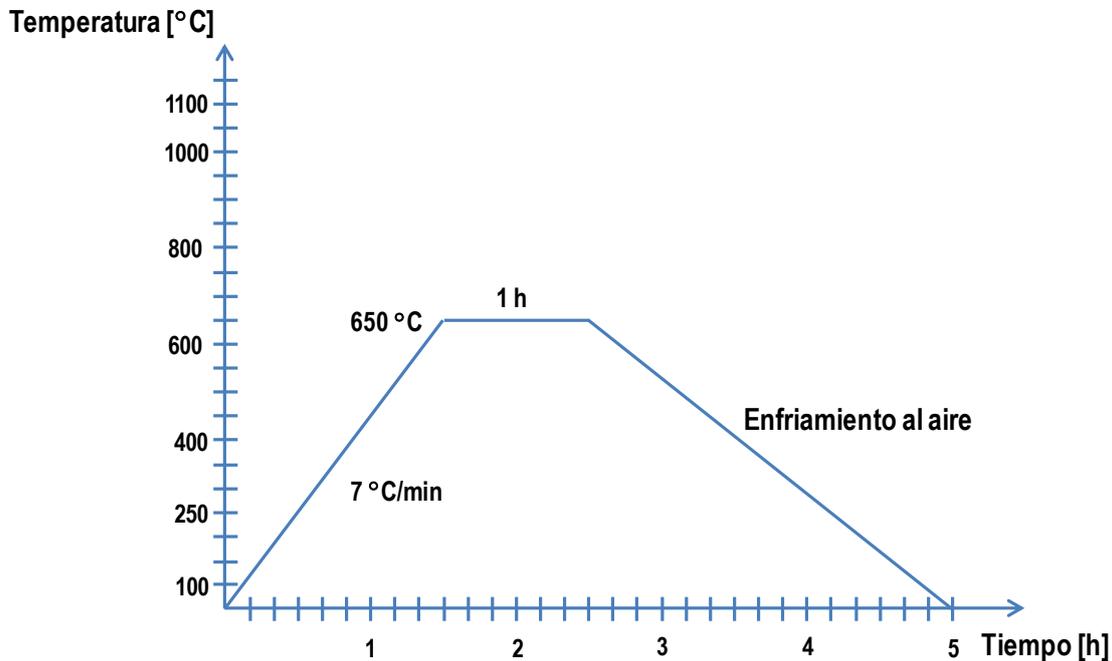


Figura 28. Ciclo de tratamiento de alivio de tensiones a aplicar a las piezas de 17-4 PH procesadas en la tecnología SLM.

Como conclusión a esta tarea cabe destacar que cualquier metal procesado por tecnologías de fabricación aditiva son susceptibles de tratarse térmicamente para eliminar las tensiones que pudiera haber en la red cristalina del material debido al rapidísimo proceso de fusión – solidificación.

La tecnología EBM precalienta los materiales a altas temperaturas, Ti64 a 700°C, ya que precisa estas temperaturas para que sea posible el proceso de fabricación, este condicionante del proceso favorece indirectamente que mientras se fabrican las piezas se esté realizando a las piezas una alivio de tensiones, por tanto, las piezas no requerirán un posttratamiento posterior para eliminar tensiones en la estructura cristalina del material.

La tecnología SLM, sobre todo las tecnologías más modernas, se están dotando de sistemas de calefacción de las placas de fabricación hasta valores cercanos a los 500°C, tal y ocurre con el modelo SLM 280 de la empresa SLM solution, esta solución está diseñada para poder procesar mitigando las deformaciones de materiales tales como aluminios, titanios y ciertas aleaciones base Níquel.

Los procesos de alivio de tensiones es recomendable realizarlos mientras se fabrica la pieza en las propias tecnologías de fabricación aditiva ya que si se realizan con posterioridad se

²⁸ Apuntes Prof. Ing. Luis Suárez. Escuela Industrial Ernesto Bertelsen Temple.

consiguen eliminar las tensiones pero las deformaciones que se hubieran generado se quedan permanentes en las piezas generando piezas menos precisas.

Tarea 4.5. Definición de estrategias de mecanizado aplicables.

Dada una pieza a fabricar el principal problema del mecanizado es la accesibilidad a la misma contando con las limitaciones del centro de mecanizado. La estrategia de mecanizado pasa por las siguientes fases.

- Identificar las actuaciones a realizar sobre la pieza.

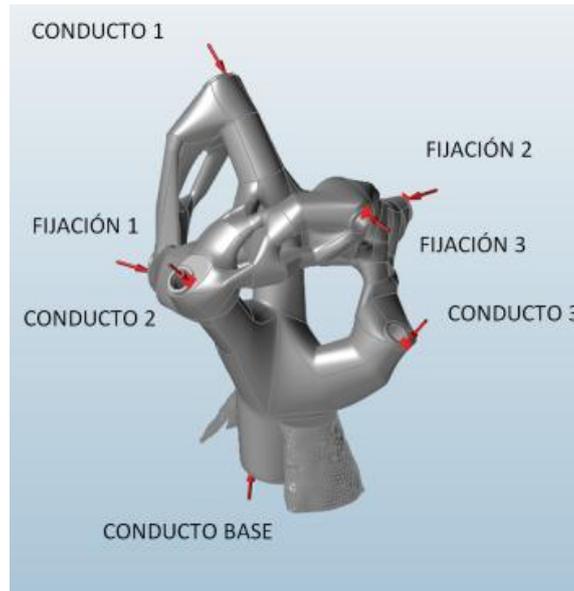


Figura 29. Identificación de intervenciones de mecanizado.

- Valorar que partes de la geometría concentran más actuaciones.

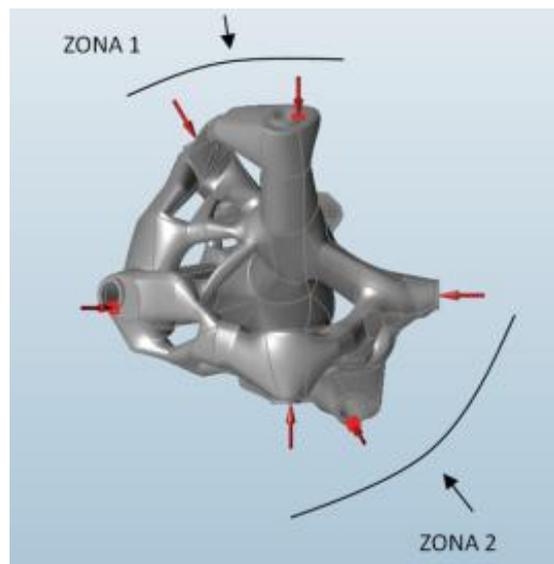


Figura 30. Valorar geometría

Como se puede ver en la figura, viendo la pieza en planta se pueden identificar dos zonas con una mayor concentración de agujeros. La tendencia, por tanto, es facilitar el acceso de la herramienta a esas dos zonas.

- Estudiar las distintas opciones de posicionamiento para dejar más accesibles esas partes de la geometría.

En la medida de lo posible hay que concentrar el mínimo posible de procesos de mecanizado en la base. A pesar de que la pieza es accesible para el mecanizado a través del propio plato resulta más costoso y requiere más tiempo de mecanizado.

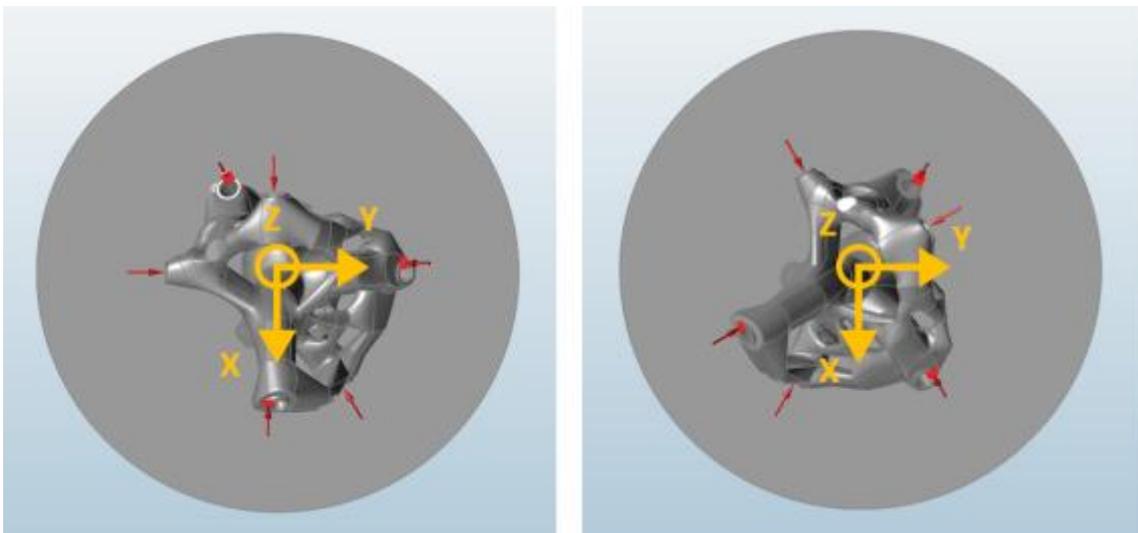


Figura 31. Diferentes orientaciones posibles en el plato.

- Verificar que se puedan realizar todas las actuaciones e identificar aquellas que queden inaccesibles o fuera del alcance de la herramienta.

Una vez se tienen las opciones que facilitan un mejor acceso al mecanizado hay que verificar que se pueda completar el trabajo sobre la pieza. En caso contrario hay que buscar las alternativas que lo permitan.

Una de las soluciones posibles y que aporta otro grado de libertad es descentrar la pieza del plato. Esto permite hacer accesibles zonas que quedan fuera del alcance de la herramienta para un mismo posicionamiento relativo de la pieza con el plato. A pesar de ello también hay que evitarlo en la medida de lo posible ya que añade complejidad al plato y requiere más tiempo para el cambio de las diferentes posiciones y para el ajuste de la herramienta.



Figura 32. Marcas de posición en el soporte del plano y vista de la pieza descentrada.

Es conveniente realizar el estudio de estas fases en la etapa previa de posicionado y orientación de la pieza para fabricación aditiva con el objetivo de tener en cuenta los problemas que se presentan en el mecanizado.

Puede influir o ser el factor decisivo a la hora elegir entre varias opciones incluso cuando algunas de ellas supongan añadir más soportes o refuerzos.

Una vez definida la posición o posiciones finales es el momento de describir la secuencia de mecanizado con el objetivo de minimizar los movimientos del brazo y los ajustes del cabezal.

Tarea 4.6. Fabricación de demostradores en los sistemas desarrollados.

A continuación se muestra diferentes imágenes de la fabricación de las piezas demo en las tecnologías de fabricación aditiva y posterior mecanizado.

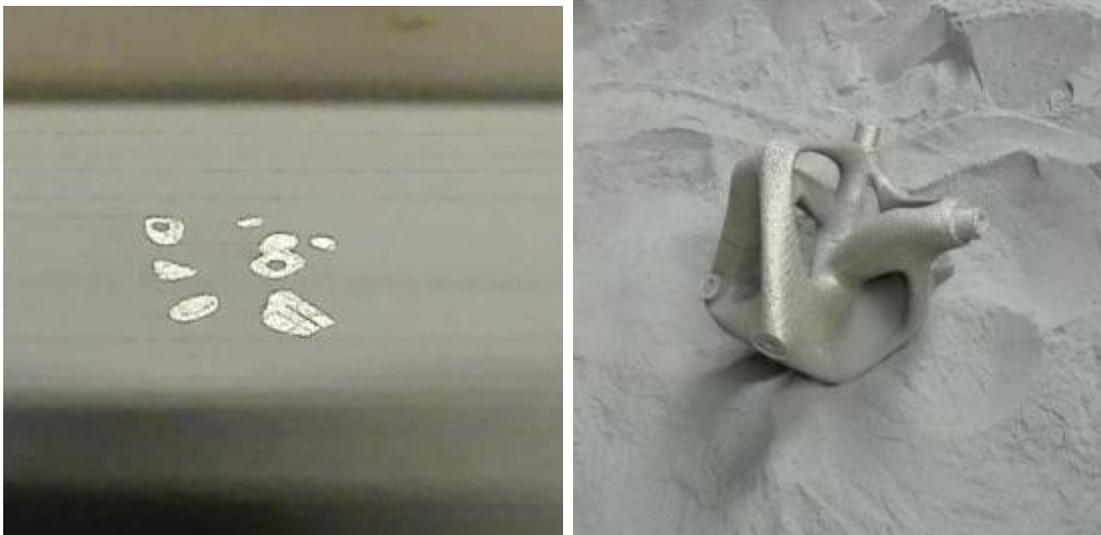


Figura 33. Pieza demo fabricada en la tecnología SLM y en proceso de extracción.

Previamente al propio de mecanizado se realizan una serie de comprobaciones para evaluar que es posible llegar a todas las zonas de interés.

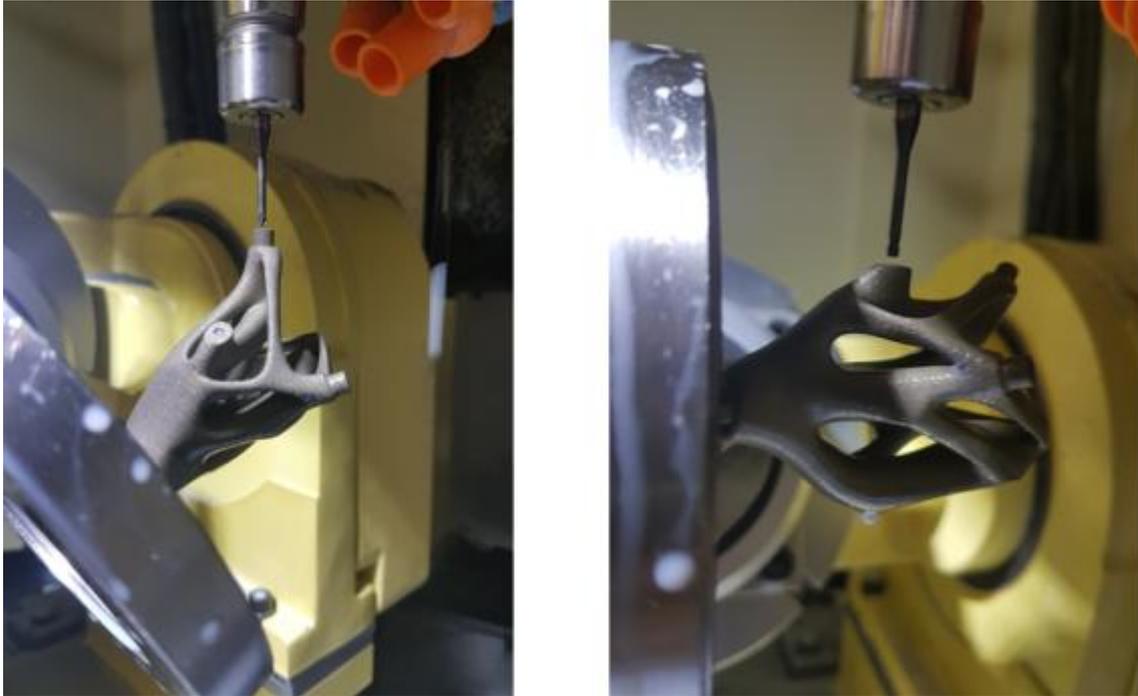


Figura 34. Imágenes del proceso de mecanizado.



Figura 35. Imágenes del proceso de mecanizado.



Figura 36. Imagen de la pieza demo fabricada en SLM mecanizada. Los refuerzos no han sido mecanizados para poderse explicar y entender bien el nuevo sistema desarrollado.

Con los sistemas de precisión se ha fabricado una pieza con geometría muy compleja en SLM y en EBM y se ha podido mecanizar con un centro de mecanizado de 5 ejes de libertad demostrando la viabilidad del proceso.



Figura 37. Piezas demos fabricadas en tecnología EBM (izquierda) y SLM (derecha) y posteriormente mecanizados diferentes orificios.

PAQUETE DE TRABAJO 5. CARACTERIZACIÓN DE RESULTADOS

Tarea 5.1. Evaluación dimensional de los resultados obtenidos.

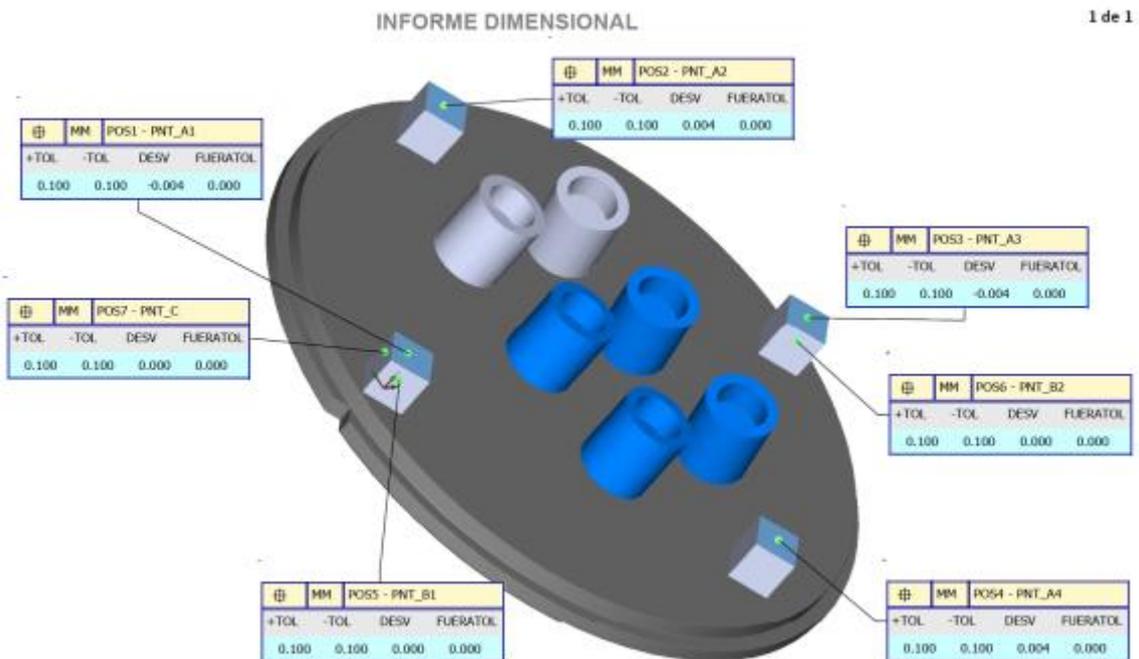
Previo a evaluar la precisión que se puede obtener en un sistema de mecanizado por ambos lados de piezas previamente fabricadas con tecnologías de fabricación aditiva, se va a obtener cual es la precisión que se puede obtener en un sistema de mecanizado por una lado, de modo que este será el patrón de comparación que utilizaremos como objetivo alcanzable en términos de precisión para un sistema de mecanizado por ambos lados.

Para evaluar la precisión alcanzable, se fabricaron unas probetas sencillas en tecnología SLM con acero 316L considerado como uno de los materiales que menores deformaciones van a experimentar durante el procesado con tecnología SLM, las probetas fueron mecanizadas en un CNC de 3 ejes.



Figura 38. Izquierda: centro de mecanizado mecanizando el interior de las probetas. Derecha: Probetas de SLM mecanizadas.

Tras el mecanizado se midieron las probetas con la medidora por coordenadas obteniéndose las tolerancias de fabricación de las piezas fabricadas en SLM respecto al CAD 3D y las superficies mecanizadas respecto al CAD3D.



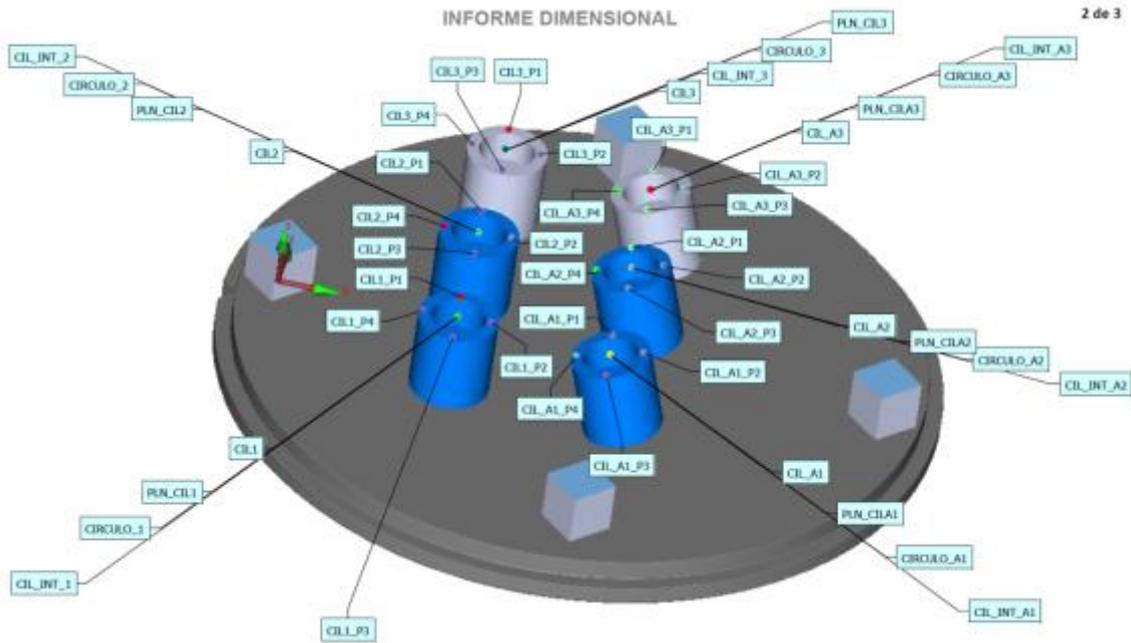


Figura 39. Figuras que esquematizan las medidas realizadas sobre las muestras o probetas.

Tabla 5. Resumen de resultados.

PLACA FD REP1	
	DESV
POS88 - CIL2_P1	0,090
POS88 - CIL2_P2	0,073
POS88 - CIL2_P3	0,092
POS88 - CIL2_P4	0,117
PLANA22 - PLN_CIL2 A ORIGEN	0,004
POS106 - CIRCULO_2	-0,040
CIRDAD2 - CIRCULO_2	0,034
POS112 - CIL_INT_2	-0,033
POS118 - CIL2	-0,093
CILDADD2 - CIL_INT_2	0,042
CILDAD8 - CIL2	0,037
CONCEN2 - CIL_INT_2 A CIL2	0,090

Como conclusión, se obtiene que:

1. El error de posición máximo obtenido entre las geometrías fabricadas en SLM respecto al CAD 3D es de **0.117mm**
2. El error de posición máximo obtenido entre las geometrías mecanizadas y el CAD 3D es de **0.090mm**

Para poder determinar la precisión del sistema mecanizando por dos lados, se partió de una geometría específicamente diseñada para este proyecto denominada “Demo precisión” la cual se ha fabricado en tecnología SLM y EBM.

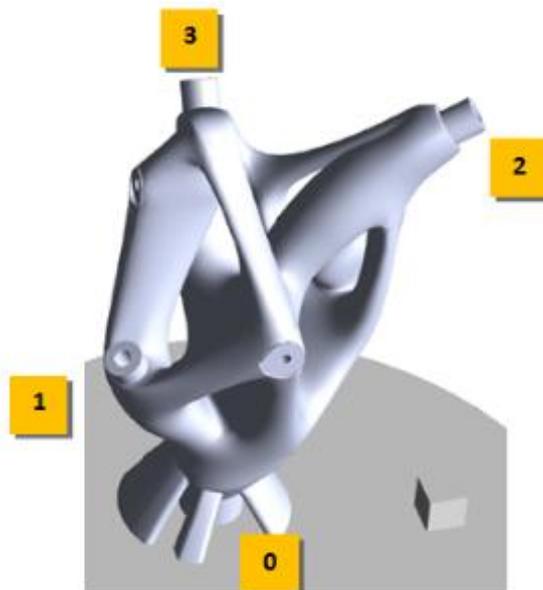


Figura 40. Imagen de la geometría de la pieza “demo precisión” identificando los cuatro orificios a remecanizar.

Los orificios 1, 2 y 3 son mecanizables directamente con un sistema clásico ya que no existen interferencias para ser mecanizadas con fresas, el orificio marcado con el número 0 su eje es perpendicular a la placa de fabricación en dirección Z negativo, por tanto, no es accesible directamente para su mecanizado. Se ha escogido esta pieza demo porque representa un problemática real muy frecuente en piezas complejas fabricadas mediante procesos de fabricación aditiva.

Para determinar la exactitud de cada proceso, se toma como referencia la Desviación entre el exterior (fabricado en SLM o EBM) y el orificio interior, fabricado mediante mecanizado (CNC). Con la medición del error de concentricidad, se determina la precisión del sistema.

El origen de coordenadas para la medición se toma en el caso de las piezas fabricadas con la tecnología SLM respecto a la base de la placa de fabricación y los alojamientos de las fijas de precisión.

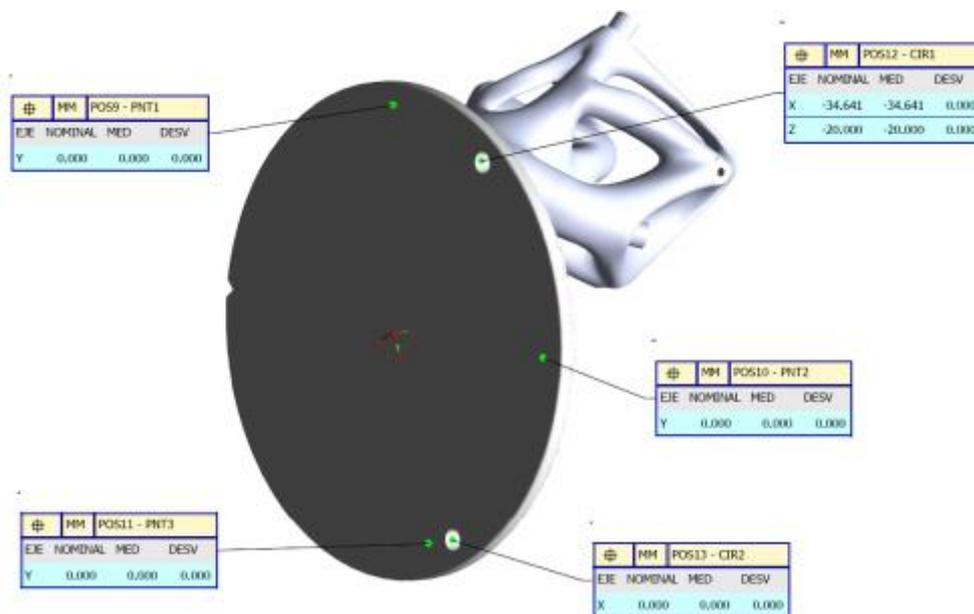


Figura 41. Referencias tomadas sobre la pieza fabricadas en tecnología SLM para fijar el origen de coordenadas previo a la medición de las piezas.

En el caso de las piezas fabricadas en tecnología EBM, como la placa de fabricación no está fijada a la máquina, el origen de coordenadas se toma respecto a unos testigos fabricados sobre la placa de fabricación, en este caso, el origen de coordenadas para la medición se toma respecto a estos elementos.

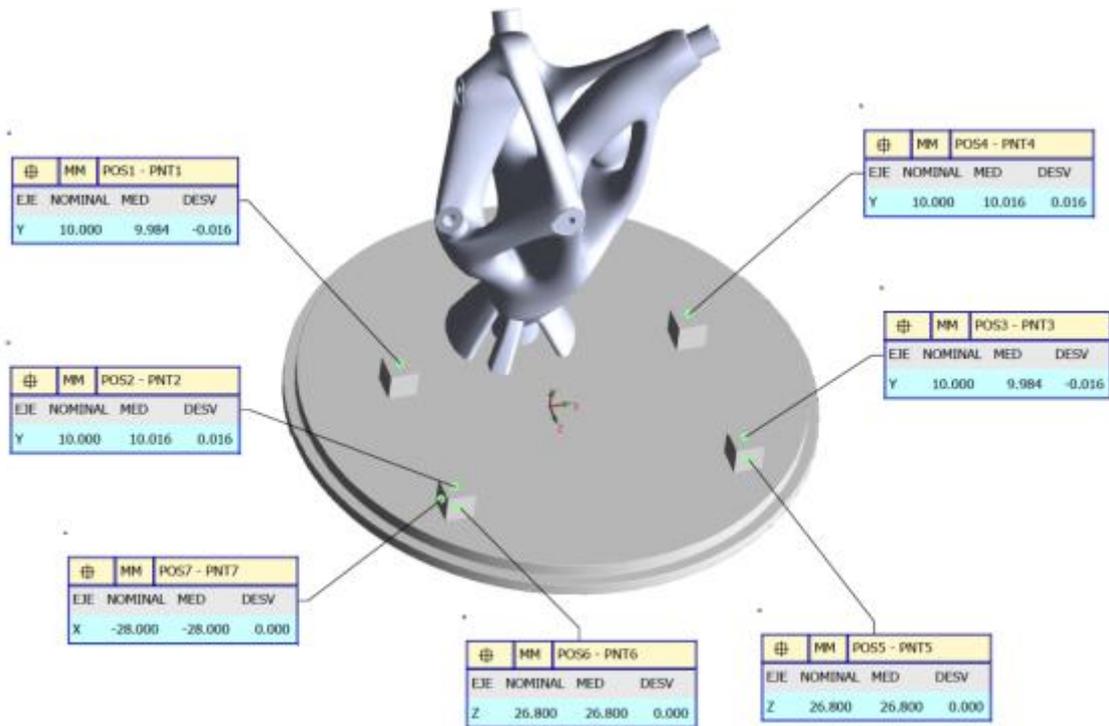


Figura 42. Referencias tomadas sobre la pieza fabricadas en tecnología EBM para fijar el origen de coordenadas previo a la medición de las piezas.

Si la precisión del sistema fuera total y la pieza durante la fabricación no experimentara deformaciones permanentes, ambos círculos serian concéntricos como ocurre en CAD, la realidad en producción es que aparecen erros de precisión y que vamos a cuantificar midiendo la desviación del centro de los cuatro orificios dispuestos en diferentes alturas, inclinaciones y orientaciones de la pieza. Tras la medición de las piezas fabricadas se obtienen los siguientes resultados:

		Desviación de la Posición			
		orif. 0	orif. 1	orif. 2	orif. 3
1	SLM estandar	0,27			
2	SLM PFA	0,12	0,18	0,33	0,64
4	EBM PFA	0,21	0,26	0,17	0,27

Tabla 6. Mediciones de desviaciones de posición de los orificios 0, 1, 2 y 3.

Se puede concluir que el orificio 0 (orif 0) sirve para identificar la precisión máxima del sistema, las mediciones adicionales en los orificios 1, 2 y 3 más alejados, acumulan una mayor error en el caso de la tecnología SLM, este hecho se debe a la utilización de un material (acero 17-4 PH) que induce deformaciones durante la fabricación debido al cambio de fases que se experimentan en su proceso de fusión-solidificación hasta temperatura ambiente. En el caso de la EBM, durante la fusión-solidificación se mantiene el material en estado sólido a

temperaturas superiores a 700°C durante toda la fabricación lo que produce un recocido en la estructura del material consiguiéndose por tanto una estabilidad dimensional mayor.

Tarea 5.2. Estudio de la influencia de los tratamientos térmicos en la eliminación de las tensiones y las deformaciones.

Los tratamientos térmicos aplicados al acero 17-4ph han influido en la microestructura del material y por ende a sus prestaciones mecánicas,

Tras el mecanizado de los orificios y posterior medición en la medidora por coordenadas de las piezas fabricadas con tecnología SLM, se ha realizado un tratamiento térmico de alivio de tensiones con la finalidad de identificar si dicho alivio de tensiones, es capaz de corregir la deformación registrada, se mantienen las deformaciones o aumentan dichas deformaciones como consecuencia del alivio de tensiones. El tratamiento térmico realizado corresponde con el descrito en la tarea 4.4.

Tras haber aplicado el postratamiento térmico, se realizó un ensayo de dureza Vickers acorde a la norma UNE-EN ISO 6507-1:2006.

Equipo de ensayo: Durómetro Wolpert V - Testor 2

Condiciones de ensayo:

- Temperatura: 21 °C
- Tiempo de indentación: 15 segundos
- Escala utilizada: HV1

MUESTRA	DUREZA MEDIA (HV)	DESVIACION TIPICA (Sc)	INCERTIDUMBRE DE LA MEDIDA
Salida de máquina	314.7	20.00	35.00
Salida de máquina zona lateral	316.3	36.00	58.00
Tratada 650 °C	380.6	10.54	23.00

La incertidumbre expandida (U) se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%.

Tabla 7. Tabla de durezas resultados de la aplicación del tratamiento térmico al acero 17.4Ph.

Tras haber aplicado el postratamiento térmico, se volvió a repetir la medición de la pieza demo obteniéndose los siguientes resultados:

		Desviación de la Posición			
		orif. 0	orif. 1	orif. 2	orif. 3
2	SLM PFA	0,12	0,18	0,33	0,64
3	SLM PFA +HT	0,12	0,18	0,33	0,64

Tabla 8. Desviación de posición antes y después de haber aplicado un tratamiento térmico de alivio de tensiones.

Como conclusiones, cabe destacar que el alivio de tensiones realizado a la pieza ha aumentado la dureza de la pieza desde 314HV hasta 380HV, además, el tratamiento térmico no ha modificado la geometría de la pieza, por tanto, se descarta que este proceso se pueda utilizar para eliminar deformaciones registradas en las piezas y también se descarta que el propio proceso térmico genere nuevas deformaciones, por tanto, las deformaciones que se registren en las piezas tras el proceso de fabricación aditiva se consideran permanentes y el tratamiento térmico solo influirá en la microestructura del material y por ende en sus propiedades mecánicas.

Tarea 5.3. Estudio comparativo entre mecanizado de piezas en SLM y EBM por el método clásico respecto al sistema de mecanizado propuesto.

Tras la fabricación de la pieza demo en las tecnologías SLM y EBM, se ha realizado una comparación en costes de fabricación, plazo de ejecución y precisión del cada sistema.

Plazos de ejecución: Para el mecanizado de las diferentes soluciones, se han identificado la necesidad de realizar una serie de acciones que algunas de ellas son las mismas pro otras solo aplican a algunos de los procesos. Las acciones por cada proceso son los siguientes:

Sistema estándar: 10 pasos para el mecanizado, en torno a 7.6 horas.

Sistema de Precision FA (Variante SLM): 4 pasos para el mecanizado, en torno a 1.5 horas.

Sistema de Precision FA (Variante EBM) :6 pasos para el mecanizado, en torno a 3 horas.

Costes de ejecución: Para el mecanizado de las diferentes soluciones, partiendo de los plazos de ejecución y unos costes simulados de coste horario en concepto de Horas de CAD, mecanizado etc, se ha realizado una simulación de los costes de mecanizado para cada proceso.

	SISTEMA estandar	SISTEMA precisión FA- variante SLM	SISTEMA precisión FA- variante EBM
CAD 3D /MEDICIÓN	0 €	0 €	56 €
SLM/EBM	150 €	0 €	0 €
CNC	306 €	99 €	99 €
TOTAL	456 €	99 €	155 €

Tabla 9. Costes de mecanizado entre sistemas de posicionamiento.

Precisión: Como conclusión, cabe destacar que los sistemas de precisión propuestos en el proyecto simplifican mucho las acciones a realizar lo cual también repercute en la precisión alcanzable finalmente, sumar procesos suma incertidumbres lo cual repercute en un precisión menor.

En general, se puede concluir que el sistema de precisión desarrollado en el proyecto para mecanizar piezas fabricadas con tecnologías de fabricación aditiva, se postula como una vía más precisa para el mecanizado de piezas en SLM, pasándose de desviaciones de 0.27mm a 0.12mm cuando se habla de pieza complejas que requieren el mecanizado por ambos lados. En el caso de la EBM, se consigue una precisión un poco menor 0.21mm debido a la necesidad de reposicionar el sistema respecto a testigos fabricados en la propia fabricación aditiva.

Respecto los costes y los plazos, el sistema desarrollado también se posiciona como una vía más rápida, con menos costes asociados, ahorrándose entre un 300% y 400% los costes lo que va a ayudar a que más productos sean económicamente producibles con la combinación de fabricación aditiva y mecanizado.

PAQUETE DE TRABAJO 6. HOJA DE RUTA DE RESULTADOS

El objetivo de este paquete de trabajo e la validación del sistema y método desarrollado aplicado a dos demostrados de diferentes sectores de aplicación y el desarrollo de una hoja de de ruta sobre expansión de los resultados y futuras líneas de investigación.

Se han desarrollado 2 tareas:

Tarea 6.1. Definición de un plan de producción para dos casos reales basados en SLM y EBM.

En esta tarea se ha llevado a cabo la validación del sistema y método de posicionamiento con precisión desarrollado mediante su aplicación a un caso estudio representativo cuyos resultados son extrapolables a cualquier geometría que se quiera fabricar y posteriormente se quieran mecanizar ciertas zonas para dotarlas de mayor precisión:

Para el demostrador se ha seguido un plan para la validación del dispositivo y método desarrollado. El plan de validación consiste en comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación del dispositivo y el método desarrollado con respecto al método de procesado tradicional.

En el estudio comparativo se han considerado los siguientes factores:

Técnico: Precisión dimensional y de posición de elementos de referencia de la geometría de la pieza a fabricar. Unidad de medida empleada: % de desviación con respecto a la geometría teórica (modelo 3D CAD), del método desarrollado con respecto al tradicional.

Temporal: Tiempo de cada una de las etapas y del proceso global. Unidad de medida empleada: % de ahorro de tiempo del método desarrollado con respecto al tradicional.

Económico: Costes de fabricación de cada una de las etapas y del proceso global. Unidad de medida empleada: % de ahorro de coste del método desarrollado con respecto al tradicional.

Con los datos obtenidos se podrá valorar las bondades del sistema desarrollado con respecto al tradicional.

Tarea 6.2. Definición de una estrategia para la difusión y expansión de los resultados obtenidos.

En esta tarea se ha llevado a cabo diferentes actividades relacionadas con la expansión y difusión de los resultados obtenidos.

Caracterización de los resultados alcanzados:

- Se ha descrito las principales innovaciones obtenidas como resultados del proyecto con respecto a las soluciones tradicionales adoptadas por el mercado. Con soluciones tradicionales nos referimos a aquellas soluciones que por diferentes circunstancias, tienen un mayor grado de implantación en el mercado, por tanto son ampliamente conocidas y adoptadas de manera habitual.
- Se ha llevado a cabo también un análisis de patentes que contempla posibles infracciones de patentes existentes, patentabilidad de los resultados obtenidos y libertad para operar.

Hoja de ruta de explotación de los resultados:

Se ha definido una hoja de ruta donde se establece una estrategia de expansión de los resultados obtenidos, así como las futuras líneas de investigación que se sustentan sobre el conocimiento generado.

En la hoja de ruta se ha incluido:

- Análisis DAFO del mercado potencial.
- Tabla de resultados y usos.
- Modelo de negocio para la futura explotación de resultados.
- Líneas de investigación futura.

Plan de difusión de los resultados:

- Se han realizado reuniones personalizadas con agentes de la cadena de valor relacionados con la futura explotación de los resultados, tales como, empresas usuarias de piezas metálicas procesadas por FA de los mercados potenciales (dental, implantes médicos, componentes de bienes de equipo y empresas de aeronáutica); empresas que dan servicio de mecanizado de piezas metálicas procesadas por FA; empresas proveedoras de tecnología. Estas reuniones se han mantenido tanto en las instalaciones de la empresa como en eventos especializados.
- Se han realizado publicaciones con carácter general en los medios habituales de AIDIMME.