

# Metodología de reparación de turbomáquinas mediante Laser Material



## Turbo engine components repair methodology by Laser Material deposition



Exequiel Ruiz-Salas, Haizea González-Barrio, Amaia Calleja-Ochoa, Eneko Ukar-Arrien y Aitzol Lamikiz-Mentxaka

Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Escuela de Ingeniería de Bilbao. Departamento de Ingeniería Mecánica. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao, Vizcaya (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8838> | Recibido: 11/05/2018 • Inicio Evaluación: 01/06/2018 • Aceptado: 18/08/2018

### ABSTRACT

• Additive Manufacturing (AM) is an on growing technology in the last decade. Aeronautical industry, among others, is getting involved in this new trend for manufacturing and repairing processes. More concrete inside AM techniques, Laser Metal Deposition (LMD) is a versatile process with the capability of any repairing task, though the use of this technology is considered a multidisciplinary process that requires knowledge of several aspects: 3D digitalization, CAD/CAM programming, and the laser cladding parameters and control. Considering these many challenges, this work states a global vision through all process stages in order to implement LMD repairing technology in several industries.

Additionally, trials were performed related to different process stages with significant results serving as initial reference for turbomachinery rotary components repairs. Finally, advantages and drawbacks of LMD process, as well as industrial pioneering companies at this sector.

• **Keywords:** Turbomachinery repairation, LMD (Laser Material Deposition), Digitalization, 3D, CAD/CAM, laser cladding, Inconel 718, Hastelloy X, hybrid machines.

### RESUMEN

La fabricación aditiva ha incrementado su campo de acción considerablemente en los últimos años. La industria aeronáutica ha sido una de las tantas que ha incorporado este tipo de procesos a la fabricación y reparación de componentes. El LMD (Laser Material Deposition) es un proceso versátil capaz de realizar casi cualquier tipo de reparación, sin embargo, el uso de dicha tecnología para la reparación es un proceso multidisciplinar y por tanto requiere del conocimiento de varios campos, como la digitalización 3D de piezas, los procesos CAD/CAM, y el propio proceso de aporte por láser. Este conglomerado de diferentes tecnologías se expone con una visión de conjunto, para ofrecer un punto de referencia que sirva para extrapolar e integrar este tipo de reparaciones en otros ámbitos. Además, se expone una serie de experimentos realizados para ofrecer metodologías propias junto a resultados que sirvan como referencia y punto de partida en la reparación de elementos de turbomáquinas. Por último, se enmarcan también las ventajas y desventajas del proceso, así como las tendencias observadas en algunas de las empresas pioneras del sector.

**Palabras clave:** reparación de turbomáquinas, LMD (Laser Material Deposition), Digitalización 3D, CAD, CAM, aporte por láser, Inconel 718, Hastelloy X, máquinas híbridas.

### 1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva ha incrementado su nicho en los últimos años y se ha extendido a diferentes áreas de la industria rápidamente, siendo el sector aeronáutico uno de ellos. Comparado con muchos otros sectores como el del automóvil, la producción de componentes aeronáuticos puede considerarse de serie corta y de alto valor añadido. La gran complejidad de las piezas, junto a las dificultades añadidas de trabajar con materiales como titanio, aluminio y superaleaciones, hacen que sea difícil realizar el salto a la producción de series más grandes. Sin embargo, esfuerzos dedicados a esta difícil tarea por parte de empresas del sector, como Airbus, Rolls-Royce y General Electric (GE) [1], han ido integrando las tecnologías aditivas cada vez más en los últimos años, y se espera que la tendencia continúe.

Existen diferentes procesos de fabricación aditiva según las distintas necesidades de materiales, acabado final, complejidad geométrica, dimensión de pieza, etc. En el sector aeronáutico son dos concretamente las que marcan tendencia, y ambas utilizan un láser como fuente de calor para fundir el material, estas son el proceso de *Selective Laser Melting* (SLM), y el de *Laser Material Deposition* (LMD).

En el proceso de SLM, se parte de un sustrato en cuya superficie se pre-deposita una capa de polvo con un espesor de 50 micras aproximadamente. Posteriormente el láser se encarga de fundir dicho material sobre el sustrato, selectivamente en las zonas de interés, creando una capa de material adherido. Seguidamente se repite el proceso, extendiendo una nueva capa de polvo que cubre a la anterior y fundiendo material localmente con el láser. Cada capa aportada sirve de sustento a la anterior, y las mismas se suceden hasta completar la geometría final. El proceso se realiza en el interior de una cámara inerte, lo que hace incluso viable el empleo de materiales altamente reactivos, como el aluminio o el titanio. Esta tecnología, es capaz de generar geometrías de gran complejidad, ofreciendo piezas cercanas a su forma final y buen acabado superficial. Por otra parte, este proceso tiene aplicaciones de reparación muy limitadas, por no decir casi nulas, ya que necesita de las capas de polvo inferiores para sustentar las siguientes [2].

En el caso del proceso LMD, el láser es el encargado de fundir el sustrato mientras que, una boquilla, inyecta polvo del material a depositar en la zona del baño fundido. Todo el proceso se protege por corrientes de gas inerte para evitar reacciones entre los materiales fundidos y el oxígeno [3]. Es un proceso menos recomendado para trabajar con materiales como titanio o aluminio, ya que presenta dificultades para garantizar una atmósfera protectora suficiente. Sin embargo, se emplea satisfactoriamente con otros

materiales, como pueden ser diferentes tipos de aceros, incluidos algunos aceros de herramienta, o con superaleaciones de níquel, tipo Inconel. A diferencia del SLM la cantidad de polvo necesaria depende, además del tamaño de la pieza, de la eficiencia de la boquilla, pero por contra es más complicada la reutilización del polvo que se desecha. A su vez el tamaño de la pieza a fabricar viene limitado inferiormente por la accesibilidad de la propia boquilla, aunque no así su tamaño superior. Aunque muchos procesos de aporte de material por LMD se realizan en 3 ejes por simplicidad, en muchos casos, y en especial en la industria aeronáutica, es necesario realizar dicho proceso en 5 ejes. Gracias a la capacidad del proceso de LMD de orientar la dirección del cabezal, este es ideal para realizar operaciones de reparación en piezas que hayan sufrido desgastes, o defectos de fabricación, y que puedan solucionarse con un aporte de material y posterior mecanizado.

La incorporación de tecnologías aditivas a los procesos de fabricación supone también incluir numerosos pasos intermedios de control. La generación de la geometría debe ser monitorizada para su posterior mecanizado; a su vez el propio proceso aditivo es lo suficientemente complejo para que sea necesario un control exhaustivo de sus parámetros. La consecución de pasos necesarios para la generación de una geometría en la que intervienen procesos de aporte de material y mecanizado es compleja y requiere de un estudio previo para cada pieza.

La finalidad de este trabajo es mostrar una metodología que sirva como base para un proceso de fabricación que incluya aporte de material y mecanizado. Dado el especial interés del sector aeronáutico, este artículo se centra en la presentación del tipo de piezas y los materiales usualmente empleados en dicho sector, así como una muestra del resto de tecnologías empleadas previas al mecanizado. Esta última operación queda fuera del alcance de este artículo debido a la amplia bibliografía existente sobre los diferentes tipos de procesos de desbaste.

### 1.1. TIPO DE PIEZAS Y MATERIALES

En la actualidad, las tecnologías aditivas presentan aplicaciones aún limitadas en la fabricación aeronáutica. La mayoría de las piezas fabricadas con este tipo de proceso suelen ser, en general, estáticas y sometidas a pocos esfuerzos. Sin embargo, existe una apuesta firme por parte de las empresas especializadas del sector que marca una tendencia clara del incremento en el uso de estas tecnologías tanto para la fabricación como para las reparaciones, que se emplean para la recuperación de piezas de alto valor añadido [1].

Algunos ejemplos de piezas fabricadas con tecnología aditiva pueden encontrarse en el motor aeronáutico LEAP 1A (*Leading Edge Aviation Propulsion*) de cuya producción en serie se encarga GE y que se encuentra operando en los Airbus A320 NEO. Gracias al uso de esta tecnología se ha conseguido la reducción del número de piezas, así como de su peso, y por lo tanto una reducción del consumo de combustible. Esta misma compañía ha fabricado y testado motores ATP (*Advanced Turboprop*) con un 35% de su composición creada mediante tecnología aditiva.

Comac, en una colaboración con diversas universidades, ha creado un larguero de ala de 5 metros mediante tecnología aditiva. Esta pieza se utiliza en el Comac 919 y pretende ser de los primeros aviones comerciales que utilicen tecnología aditiva para piezas estructurales.

En el caso de los turbofan de la serie BR700 de Rolls-Royce, se emplean tecnologías de LMD para la creación de soportes, abrazaderas y bridas sobre su carcasa. La baja afectación térmica del proceso hace que pueda despreciarse las distorsiones de los componentes y el gas protector localizado garantiza el aporte de material sin oxidaciones.

Algunas piezas sufren desgaste durante su desempeño como suele suceder con los alabes de las turbinas. La erosión y otros tipos de daño directo deterioran generalmente el frente del alabe y este debe ser reparado. Los componentes de turbomáquinas son piezas de un alto valor añadido cuya reparación supone grandes ventajas económicas, ya que evita su retirada tras la aparición de dichos defectos y elimina la necesidad de disponer de un almacén de repuestos excesivamente amplio [4].

En cuanto a los materiales utilizados en la fabricación aditiva, ya se ha mencionado que existe un amplio rango en el que se incluyen aceros, aceros de herramienta, titanio, aluminio y superaleaciones de níquel. Los primeros tienen un menor impacto en el ámbito aeronáutico, mientras que el titanio y el aluminio son de gran importancia, debido a su baja densidad. Las superaleaciones de níquel son también apreciadas y necesarias en dicho sector, gracias a su alta resistencia térmica. Para el titanio y el aluminio el uso de la tecnología de LMD es menos frecuente debido a las posibles oxidaciones presentes durante el proceso. Sin embargo, existen centros en los que, aun así, se opta por dicho proceso en cámaras cerradas y completamente inertes, que ofrecen un ambiente libre de oxidaciones. El caso más extendido es el del LMD utilizado con superaleaciones de níquel.

Algunos ejemplos de piezas reparadas por este tipo de tecnología junto a materiales empleados con la misma se citan en las tablas siguientes (Tabla I).

En el Centro de Fabricación Avanzada de la Escuela de Ingeniería de Bilbao se han realizado ensayos de caracterización y fabricación de elementos con geometrías de tipo *Bladed Disk (blisk)*, en materiales como Inconel 718 y Hastelloy X, con el fin de demostrar la capacidad de reparación de dichos elementos mediante tecnología aditiva y su posterior mecanizado.

## 2. ADECUACIÓN DEL PROCESO LMD A LA REPARACIÓN DE ELEMENTOS AERONÁUTICOS

Como se ha expresado en los apartados anteriores, existe una necesidad por parte de las empresas especializadas en aeronáutica de crear procesos de fabricación y reparación que sean cada

Piezas reparadas por LMD		Lista de algunos de los materiales empleados para la reparación	
Turbomáquina	Componente	Inconel 625	Rene 80
JT9D-7R4D/G	TB1	Inconel 713	Rene 142
JT9D-7R4G	TB2	Inconel 718	Nimonic 90
PW-4000	TB1/TB2	Inconel 738	GTD 111
PW-2037	TB1	Inconel X750	Stainless 410
V2500	TB1/TB2	Inconel 901	PWA 694
F110	TB1	MAR M002	PWA 795
F100	TB1	Hastelloy X	PWA 1447
CF6-80C2	Stage 1	Travelloy	MAR M247
CF6-80 <sup>a</sup>	Stage 1	CM 64	Stellite 694
CF6-50	Stage 1	C263	Waspalloy
CF6-50 PIP	Stage 1	Titanium 6-4	Haynes 188
CF6-6	Stage 1		
CF6-6	Stage 2		
CF6-80C2	Stage 2		
CF6-80 <sup>a</sup>	Stage 2		

Tabla I: Distintas piezas reparadas por tecnología LMD y materiales empleados [5]

vez más versátiles y capaces de generar o reparar geometrías más complejas.

Un proceso de reparación mediante LMD requiere de una serie de pasos que serán descritos en los siguientes apartados, a medida que se aporta experiencia propia generada. En términos generales, el CAD (*Computer-aided Design*) de una pieza sin defectos suele ser conocido, pero la geometría de una pieza dañada no. Es por ello que, un paso importante antes de comenzar con una reparación es poder adquirir información sobre la geometría a reparar. Para ello, se procederá a la descripción de un proceso, a través del cual puede inspeccionarse una pieza, para obtener la información necesaria e identificar zonas dañadas. Este mismo proceso puede emplearse más tarde para comparar la pieza final con la teórica, a fin de conocer si la reparación ha sido satisfactoria.

La tecnología de LMD tiene una gran cantidad de parámetros de entrada y se trata de un proceso muy complejo y sensible a los cambios de los mismos. Para conseguir un buen resultado final es necesario parametrizar el proceso, y esto debe hacerse para cada material. Se describirá en un apartado posterior la metodología empleada para dicha caracterización del material, aportando datos específicos de algunos materiales utilizados en la fabricación de una geometría tipo *blisk*.

Una vez conseguida la geometría de las zonas a reparar, así como los parámetros del proceso, es necesario desarrollar una estrategia de aporte de material que cubra la zona afectada para su posterior mecanizado y acabado final.

## 2.1. DIGITALIZACIÓN 3D DE LA PIEZA PARA COMPARACIÓN CON CAD ORIGINAL Y DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE DEFECTOS

La digitalización 3D de la pieza de estudio responde a una doble finalidad. Por un lado, se digitaliza la pieza de estudio para su comparación con el modelo CAD. Esta fase de la etapa de calidad del proceso de fabricación de la misma permite detectar diferencias entre el diseño original de la pieza y la pieza final fabricada. Por otro lado, se recurre a la tecnología de digitalización 3D para la detección de defectos en la pieza fabricada y que son suscep-

tibles de su reparación mediante LMD. En ambos casos el proceso de digitalización 3D consta de dos fases, una primera fase de adquisición de datos y una segunda fase de tratamiento o procesado de los mismos de forma que den lugar a un fichero en formato de diseño.

En la industria, existen diferentes tecnologías para la adquisición de puntos de la pieza que se realiza en el proceso de digitalización 3D, entre las que destacan métodos de contacto y métodos sin contacto u ópticos. Incluso algunos equipamientos combinan hoy en día ambas tecnologías para aportar mayor versatilidad al usuario (Fig.1). Entre los métodos de contacto destacan las denominadas Máquinas de medir por coordenadas (MMC), que mediante palpadores de contacto punto a punto o palpadores continuos captan los datos de la geometría de la pieza. Se trata de equipos muy precisos [6]. Al tratarse de métodos de contacto no son susceptibles de ser utilizados para la medición de materiales blandos.

Por otro lado, los sistemas ópticos (Fig.2), que basan su funcionamiento en la proyección de luz láser sobre la superficie a medir, al no recurrir al contacto, son más rápidos en la fase de captación de datos, pero presentan ciertas limitaciones con materiales que permiten el paso de la luz o materiales en los que se refleja la misma. En este sentido, es necesario la utilización de spray o pinturas para intentar solucionar estos problemas. La geometría a medir es también un factor a tener en cuenta a la hora de la medición de la misma. En el caso de los equipos de contacto, hay que tener en cuenta la accesibilidad y la ausencia de colisiones del palpador con el resto de elementos a la hora de acceder a la zona de palpado. En el caso de los equipos ópticos hay que garantizar que la luz puede llegar a la zona de la pieza a escanear. Así cavidades profundas a través de plano inclinados son algunos de los ejemplos críticos a medir.

Otro de los factores a tener en cuenta en la digitalización 3D es la portabilidad de los equipos. Dependiendo del tamaño y posibilidad de traslado de la pieza a la zona de medición, se recurre a equipos estáticos y de mayor tamaño o a equipos más pequeños y portátiles. La presencia en el mercado de estos equipos portátiles se ha incrementado en los últimos años, tanto si son de contacto como ópticos.

En conclusión, las características de la pieza (tamaño, material, geometría) a digitalizar y la precisión requerida determinan la utilización de uno u otro equipo de digitalización 3D.

## 2.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARA EL PROCESO DE APORTE MEDIANTE LMD

PARA PONER EN MARCHA UN PROCESO DE LMD SE DEBEN CONOCER, PARA CADA MATERIAL, PARÁMETROS BÁSICOS, COMO LO SON LA POTENCIA Láser necesaria, la velocidad de avance, el flujo másico de polvo y los caudales de gases necesarios [7].



Fig. 1: Máquina de medir por coordenadas MITUTOYO CRYSTA APEX S 9106



Fig. 2: Sistemas ópticos Leica Absolute Tracker AT402 y ATOS Triple Scan

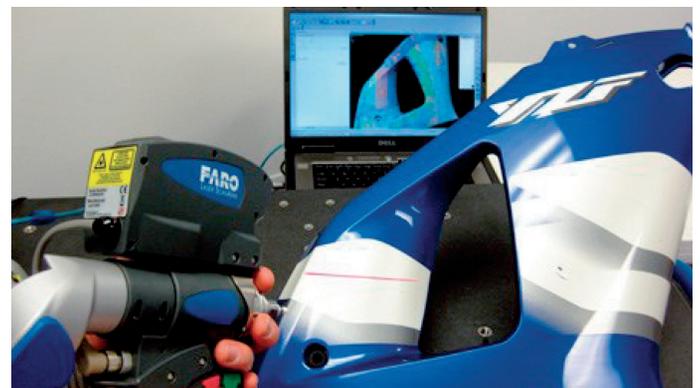


Fig. 3: Sistemas digitalización 3D portátiles

(% en peso)													
Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B	Nb	Al	Ti	
47 (bal)	22	18	9	1.5	0.6	0.1	≤1	≤1	≤0.008	≤0.5	≤0.5	≤0.15	

Tabla II: Composición química de Hastelloy X

En el Centro de Fabricación Avanzada, se han llevado a cabo ensayos para conocer dichos parámetros, y la metodología empleada ha sido la siguiente. Primero se han realizado una serie de cordones simples en los que se busca encontrar el acuerdo óptimo entre los parámetros mencionados previamente. En segundo lugar, se debe ensayar la superposición necesaria entre cordones que garanticen una capa de material homogénea sin poros ni grietas. Más tarde se obtiene la altura conseguida con el aporte de una capa sobre el sustrato y el incremento de cota entre capas subsiguientes.

A modo de ejemplo se ofrecen los resultados obtenidos mediante la metodología descrita en el párrafo anterior para el material Hastelloy X, cuya composición se especifica en la tabla 1. Los parámetros utilizados en los primeros ensayos para la serie de cordones únicos se adjuntan en la tabla 2.

La selección del conjunto de parámetros óptimos se realiza tras examinar la sección transversal de los cordones y realizar me-

diciones del ancho, alto y ángulo de mojado de los mismos, figura 4. Se busca maximizar la altura, siempre que esta sea inferior a un tercio del ancho del cordón, y que el ángulo de mojado sea inferior a 45°.

El conjunto de parámetros utilizados en el ensayo número 12 se selecciona como el óptimo. Pueden observarse en la Figura 5 los cortes transversales del mismo, así como su ancho que es de aproximadamente 1,85mm.

El uso de dichos parámetros junto a una superposición entre cordones igual al 40% del ancho de los mismos, da como resultado capas de aproximadamente 0,5mm de altura. A partir de esta caracterización se obtienen los datos suficientes para comenzar a diseñar la estrategia de aporte óptima para la reparación o fabricación de una pieza.

Como se menciona con anterioridad en este artículo, otras de las aleaciones empleadas en este tipo de reparaciones son las de Inconel [8], cuyos parámetros de operación difieren de los mostrados para el Hastelloy X. A modo de ejercicio comparativo se exponen los resultados obtenidos en ensayos similares, con el mismo equipamiento, para el Inconel 718. En este caso, la potencia necesaria es de 800W, utilizando un caudal másico de polvo de 7g/min y una velocidad de avance de 600mm/min. Estos parámetros resultan en cordones de aproximadamente 1,6mm de ancho que,

Ensayo	Potencia Láser (W)	Avance (Feed Rate) (mm/min)	Caudal de polvo (g/min)
Ensayo 1	500	500	4
Ensayo 2	600	500	4
Ensayo 3	700	500	4
Ensayo 4	400	400	4
Ensayo 5	500	400	4
Ensayo 6	600	400	4
Ensayo 7	500	500	6
Ensayo 8	600	500	6
Ensayo 9	700	500	6
Ensayo 10	400	300	3
Ensayo 11	500	300	3
Ensayo 12	600	300	3

Tabla III: Parámetros de cordones únicos

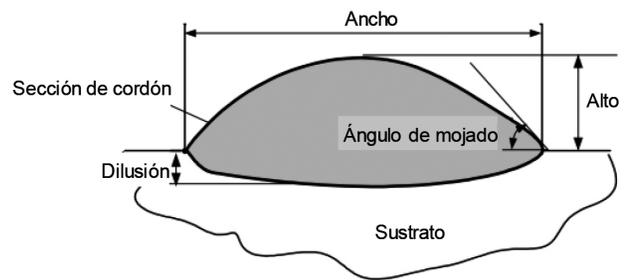


Fig. 4: Sección transversal de un cordón

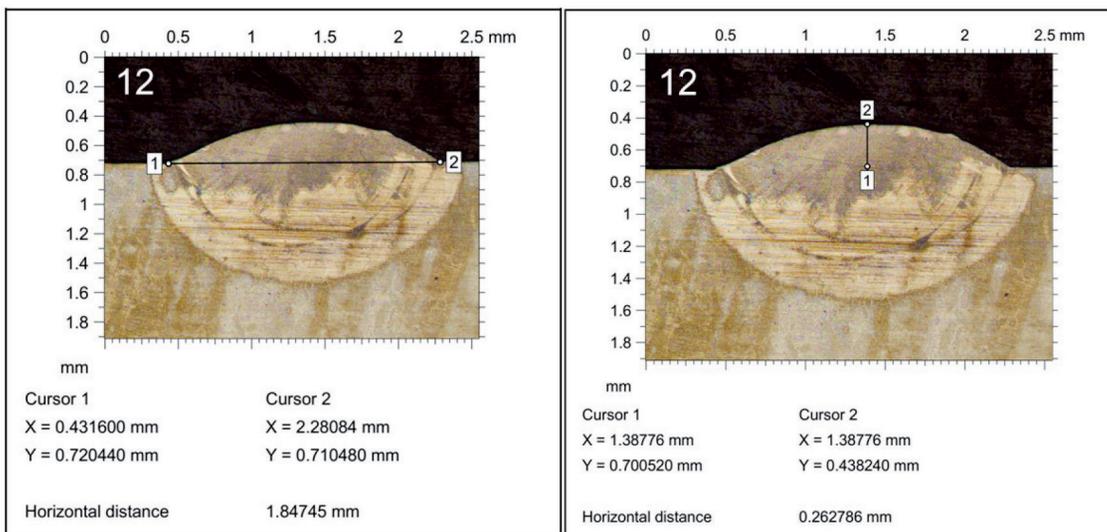


Fig. 5: Metalografía de corte transversal de un cordón único del ensayo número 12

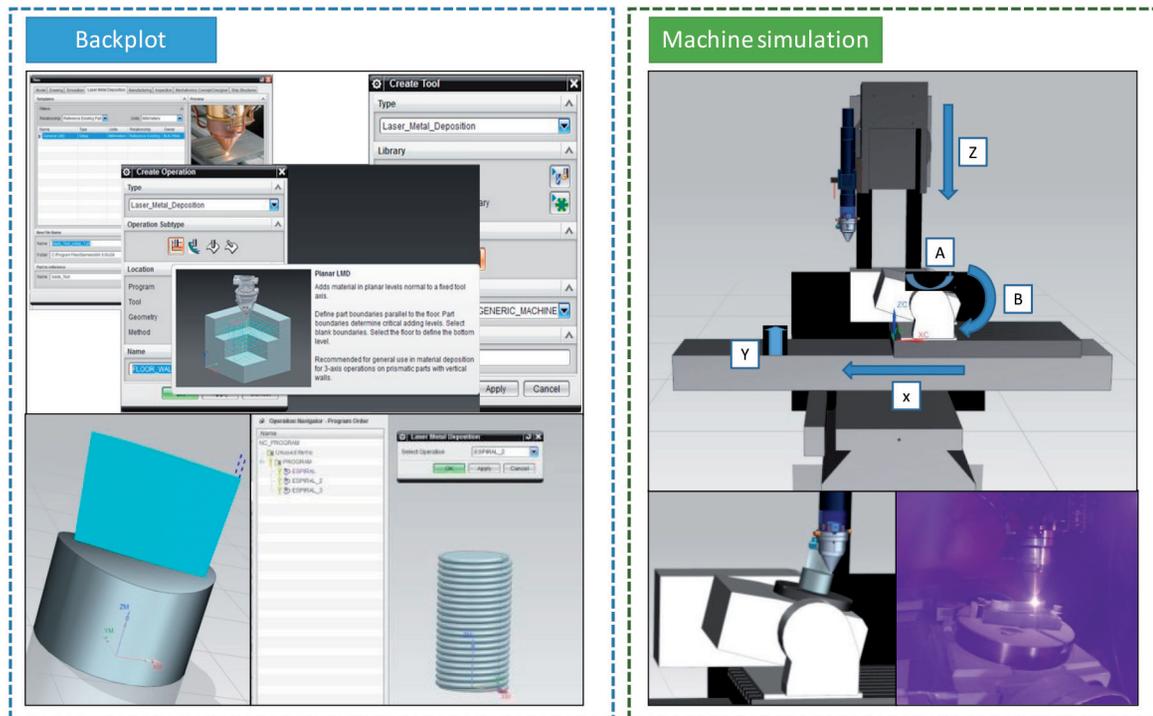


Fig. 6: Desarrollo de API (Application Programming Interface) para CAM de LMD [13]

junto a una superposición del 27%, generan capas de 0,6mm de altura aproximadamente.

### 2.3. ESTRATEGIAS CAM PARA REPARACIONES MEDIANTE LASER METAL DEPOSITION (LMD)

EXISTEN GRANDES AVANCES EN SOFTWARE CAD/CAM/CAE (CAD: Computer-aided Manufacturing; CAE: Computer-aided Engineering) para la fabricación por arranque de viruta, que ofrecen unas herramientas muy potentes en lo referente a operaciones de mecanizado convencionales – como es el caso del fresado, torneado o taladrado-. Sin embargo, cuando se hace referencia a la fabricación aditiva, ésta conlleva nuevos desafíos en el avance de este tipo de software. Replicar un proceso que implica un amplio número de variables, como es el caso de la potencia del láser, la velocidad del proceso, el flujo de polvo y las propiedades del material, entre otros, se ha convertido en una necesidad cada vez más presente en la industria [3]. Además, la digitalización de dicho proceso no sólo presenta dificultades a la hora de tener en cuenta todos los parámetros citados, sino que se puede considerar una fase crítica del desarrollo cuando se refiere a la comunicación correcta entre máquina y software, el correcto post-procesado de las trayectorias definidas teniendo en cuenta las funciones pertenecientes a dicha tecnología, y la estandarización del proceso [9].

Numerosos avances han sido presentados por los diferentes desarrolladores de software, entre ellos se encuentra la compañía alemana AIX-Path (GmbH) que ha desarrollado un módulo para virtualizar el proceso de LMD en la reparación de turbinas de gas; dicho módulo genera estrategias de aporte y una estimación de la geometría final de la pieza [10]. Por otro lado, la compañía Siemens presentó en la EMO de Milán (2015) el desarrollo de un módulo para dar cobertura a las necesidades de la fabricación aditiva dentro de su software NX; dicho software se ha desarrollado en colaboración con DMG/MORI para la máquina de mecanizado híbrido Lasertec 65D [11].

La estructura del software CAM orientado a la fabricación aditiva se puede dividir en dos funciones independientes y que a su

vez se relacionan entre sí para ofrecer una solución al proceso de manera global. Por una parte, se denomina *Backplot* a lo que hace referencia a la definición de estrategias de aporte, definición de herramienta y la verificación de los movimientos de herramienta respecto a la pieza. Por otra parte, se denomina *Machine simulation* a la parte de verificación de las colisiones y movimientos de los distintos componentes de máquina existentes en el proceso [12].

La Figura 6 muestra una solución desarrollo propio, por González et al [18], para cubrir la necesidad de un software CAM para esta tecnología. La solución pretende dar cobertura a las dos funciones citadas anteriormente, ofreciendo la opción de definir las estrategias de aporte más adecuadas para cada geometría, tanto para 3 ejes como para 5 ejes. Cuando se tratan de geometrías complejas que requieren de operaciones de aporte en 5 ejes, en la medida de lo posible es recomendable aplicar el principio de perpendicularidad, manteniendo así el haz láser perpendicular a la superficie de aporte [14].

La tendencia hacia la fabricación híbrida utilizando máquinas *multitasking* (que combinan diferentes tecnologías en una misma máquina), más concretamente las que unifican procesos aditivos con procesos sustractivos, requieren una solución que englobe todos los factores de ambas tecnologías [15]. La reparación o fabricación de geometrías complejas exigen operaciones, tanto aditivas como sustractivas, de gran precisión. Por este motivo existe una necesidad en lo que se refiere a la definición óptima de estrategias de aporte y mecanizado para que no interfieran entre sí, siendo estas críticas para las distintas fases del proceso productivo.

La Figura 7 muestra una solución combinada para la fabricación híbrida (LMD + Mecanizado) realizada en la Universidad del País Vasco. Muestra las 3 vías que conlleva este tipo de fabricación: LMD haciendo uso de la API (Application Programming Interface) desarrollada para la programación de estrategias complejas, fresado convencional haciendo uso de la herramienta NX de siemens y su módulo de CAM, o finalmente el proceso global que pasa desde el diseño, la generación de la pieza (LMD) y su posterior acabado (mecanizado).

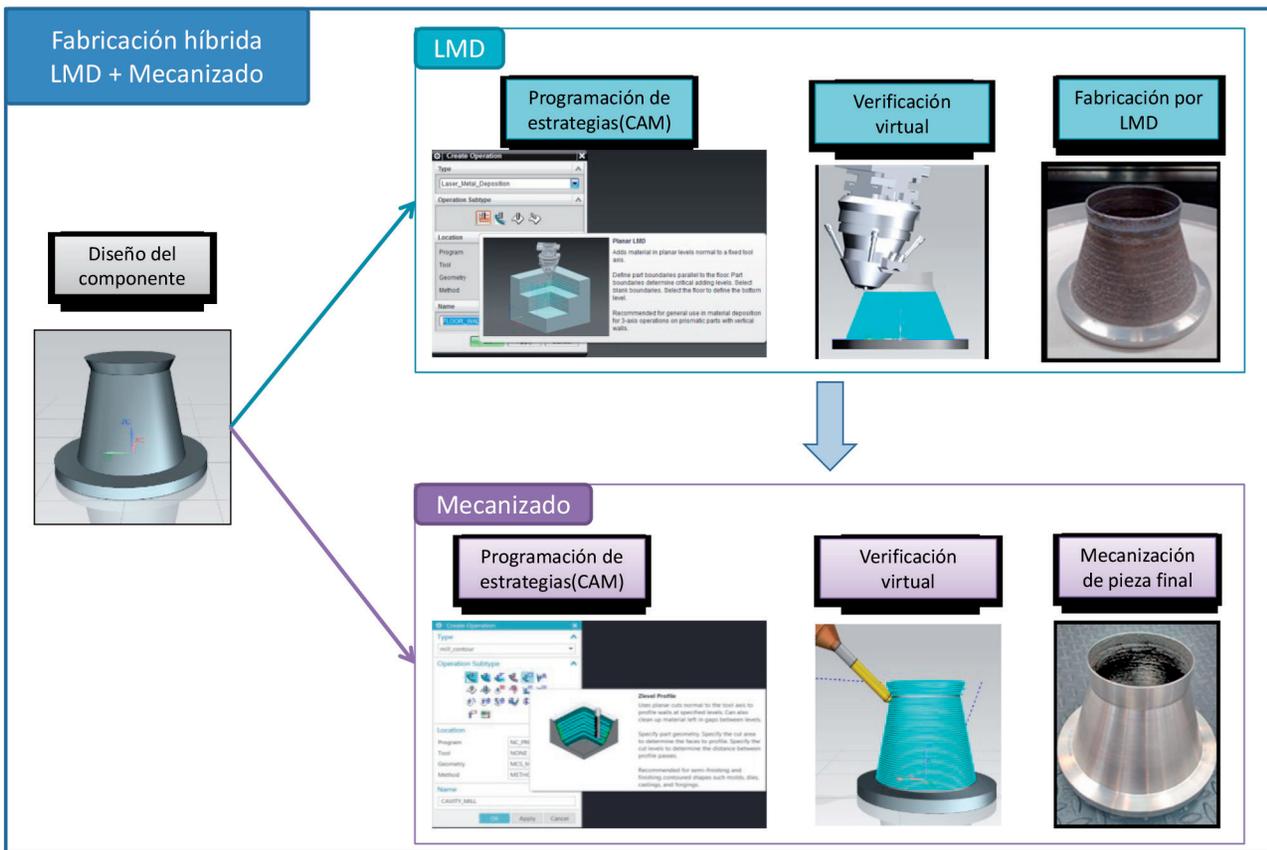


Fig. 7: Aplicación de un proceso híbrido (LMD + Mecanizado) realizado en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

**2.4. PIEZA TEST TIPO BLISK FABRICADA MEDIANTE LMD**

Si bien el mecanizado de la pieza reparada escapa a la extensión de este documento, se ha entendido conveniente ilustrar la estrategia empleada en la fabricación de una pieza muestra tipo *blisk* como demostrador de la capacidad de reparación de dichos componentes. Todo esto en el marco de diversos proyectos de investigación llevados a cabo en el Centro de Fabricación Avanzada de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

En este ensayo se evaluaron tanto estrategias de fabricación, como de accesibilidad y diferentes estrategias de aporte mediante proceso CAM para la reparación de geometrías en 5 ejes. Para el aporte de los diferentes alabes se consideraron dos tipos de estrategias para las trayectorias. La primera consistía en depositar el material, capa a capa, creando un perímetro cerrado y luego rellenando el interior. Tras diferentes ensayos se determinó que las dimensiones de los alabes se conseguían mediante el aporte de dos cordones adyacentes y por lo tanto no hacía falta relleno del perímetro. Estos resultados llevaron a una segunda estrategia

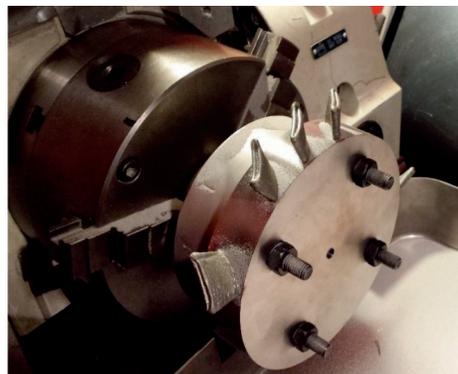
que consistía en el aporte continuo de cada alabe, desde su base hasta la altura deseada, en una trayectoria helicoidal. Esta segunda estrategia ofrecía un proceso más estable, evitando el recargue de material que puede observarse en la figura 8 (a) sufrido con la primera. Sin embargo, por el contrario, incorporaba una dificultad añadida al proceso debido a la escasa accesibilidad de la boquilla para aportar alabes situados entre otros dos ya aportados [16].

Se optó finalmente por la segunda estrategia, dado que la finalidad de esta pieza consistía en demostrar tanto la accesibilidad así como la capacidad del proceso para la reparación de piezas aeronáuticas similares.

Un ejemplo de la complejidad que supone la integración de aspectos como la digitalización, la programación, simulación de estrategias y trayectorias, así como la obtención de parámetros adecuados de proceso, son los diversos proyectos existentes actualmente a nivel europeo. Entre ellos destaca el proyecto H2020 PARADISE (ID: 723440) debido a su nivel de complejidad, el mismo pretende abordar un desarrollo como el planteado en el presente artículo orientado a racionalizar, estructurar y poner a disposición de las partes interesadas de la cadena de valor de fabricación los conocimientos y las herramientas para combinar dos procesos complementarios: LMD y Mecanizado (fresado y torneado). En consonancia con lo aquí presentado se aborda el desarrollo de tecnologías de CAD, CAM y CAE específicas, así como la integración de componentes inteligentes y sistemas de monitorización y control adaptados para el proceso híbrido de una manera rentable y con conocimiento sólido sobre el proceso de LMD. La solución PARADISE, en fase de desarrollo actualmente, ofrecerá en un futuro cercano una combinación sinérgica en-



(a) Defecto de acumulación de material  
 Fig. 8: Diferentes estrategias de aporte



(b) Ensayo de estrategias helicoidales y accesibilidad

tre: i) la alta flexibilidad para los diseños y los materiales que se utilizarán, la alta eficiencia del material y los altos ahorros en recursos materiales y los costos asociados de las operaciones LMD; y ii) la alta precisión, la alta robustez y la alta productividad de las operaciones sustractivas.

El desarrollo final se integrará en la máquina híbrida 'ZVH45/1600 Add + Process' del fabricante IBARMIA (socio de PARADISE), que ya está disponible en el mercado y en las instalaciones de TECNALIA (coordinador del proyecto).

Así, mediante el desarrollo de un proceso de fabricación combinado, los fabricantes de componentes metálicos de gran valor añadido podrán combinar la alta calidad y alta productividad con un uso mínimo de materiales y recursos energéticos en la fabricación de esas piezas, lo que reducirá los costos de fabricación de manera sensible.

### 3. CONCLUSIONES

La información y la metodología expuestas en este artículo han sido suficientes para la generación de una geometría mediante tecnología de aporte de material, así como su digitalización para su posterior mecanizado. De todos los apartados anteriores podemos concluir que, el uso conjunto de las diferentes tecnologías expuestas representa una metodología apta para la reparación de componentes de turbomáquinas mediante el proceso de LMD, planteando como proceso a seguir el siguiente:

1. Obtención de la geometría de la pieza con defectos, mediante la digitalización 3D de la misma.
2. Comparación del modelo 3D obtenido con el CAD original para la detección de defectos
3. Caracterización del material de reparación.
4. Desarrollo de la estrategia mediante uso de software tipo CAM.
5. Reparación de la zona afectada.
6. Mecanizado de la zona reparada
7. Obtención de la geometría de la pieza reparada, mediante la digitalización 3D de la misma.
8. Comparación de modelo 3D de pieza reparada con CAD original para validación de reparación.

Se han identificado los problemas y defectos que puedan surgir en los pasos necesarios para la fabricación o reparación de piezas que integran procesos aditivos y sustractivos. A continuación, se hace especial mención a las ventajas y desventajas que supone el empleo de este tipo de metodologías.

Una de las principales ventajas que persigue este tipo de procesos es, el conseguir un menor gasto de material tanto para la fabricación como la reparación de piezas de alto valor añadido. A su vez, la obtención de piezas cercanas a la forma final tiene consecuencias positivas desde el punto de vista de los procesos de mecanizado y acabado. La reparación de componentes de alto valor añadido ayuda también a evitar la necesidad de un almacén de repuestos excesivamente grande, con el consecuente beneficio económico.

Sin embargo, este tipo de procesos híbridos aun cuentan con algunas desventajas importantes, El artículo en sí muestra la increíble complejidad que supone tanto la fabricación como la reparación, desde el punto de vista de diseño del proceso. Hay una gran interacción entre diferentes disciplinas y por lo tanto exige de un amplio conocimiento por parte de las personas que intervienen en estos procesos. A pesar de suponer grandes ventajas económicas, los procesos aditivos y de digitalización de piezas suelen ser es-

labones débiles en la cadena de producción, ya que suponen un consumo de tiempo considerablemente alto con respecto al resto de operaciones de desbaste.

Es necesario poder garantizar la repetitividad del proceso, mejorar los acabados, así como profundizar en el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales aportados. Incrementar la productividad de piezas fabricadas mediante procesos aditivos implica continuar con la integración de los procesos de aporte y mecanizado en máquinas híbridas, así como la sensorización y el equipamiento capaz de realizar el seguimiento del proceso y lanzar correcciones durante la producción. Todos estos desafíos se encuentran incluidos en la filosofía del *Industry 4.0*

La necesidad de software CAD/CAM para la realización de fabricación aditiva, principalmente en geometrías que requieren de un aporte en 5 ejes continuos, es una realidad palpable entre los fabricantes de máquina-herramienta y de softwares CAD/CAM/CAE.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Joakim Ålgårdh, Annika Ströndl, Sven Karlsson, et al, "State-of-the-art for Additive Manufacturing of Metals (2016-03898)", Junio 2017.
- [2] Andres Gasser, "Laser Metal Deposition (LMD) and Selective Laser Melting (SLM) in turbo-engine applications", Laser Material Processing, Abril 2010.
- [3] Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S., Laser Cladding, CRC Press (2004).
- [4] Volker Boehm, "Hybrid Manufacturing of Turbine Components", Laser Technik Journal, Febrero 2016.
- [5] David Kaser, "Laser Powder Fusion Welding", Huffman Corporation.
- [6] I. Puertas, C.J. Luis Pérez, D. Salcedo, J. León, R. Luri, J.P. Fuertes, Precision Study of a Coordinate Measuring Machine Using Several Contact Probes, Procedia Engineering, Volume 63, 2013, Pages 547-555, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.260>.
- [7] Gasser A., Laser Metal Deposition, Tailored light 2, Springer (2011).
- [8] L Jyothish Kumara, Prof. C.G. Krishnadas Nairb, "Laser metal deposition repair applications for Inconel 718 alloy", Materials Today: Proceedings 4, 11068-11077 (2017).
- [9] M.K. Thompson et al. / CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016) 737-760752.
- [10] [www.aixpath.de](http://www.aixpath.de).
- [11] <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/nx/for-manufacturing/cam/hybrid-additive-manufacturing.shtml>.
- [12] Hedrick, R. W., Urbanic, R. J., & Burford, C. G. (2015). Development considerations for an additive manufacturing CAM system. IFAC-PapersOnLine, 28(3), 2327-2332. <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.435>.
- [13] González, H., Arrizubieta, I., Calleja, A., Ruiz, J.E., Lamikiz, A. (2017) "CAM development for Additive Manufacturing in turbo-machinery components" Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain.
- [14] Calleja, A., Tabernero, I., Fernández, A., Celaya, A., Lamikiz, A., & López De Lacalle, L. N. (2014). Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations. Optics and Lasers in Engineering, 56, 113-120.
- [15] Calleja, A., Gonzalez-Barrio, H., Polvorosa-Teijeiro, R., Lopez-De La Calle Marcaide, L. (2017). MULTITASKING MACHINES: EVOLUTION, RESOURCES, PROCESSES AND SCHEDULING. DYNA, 92(6). 637-642. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8237>.
- [16] Calleja A., Tabernero I., Ealo J.A., Campa F.J., Lamikiz A., López de Lacalle L.N. "Feed rate calculation algorithm for the homogeneous material 5 deposition of blisk blades by 5-axis laser cladding", Int. J. Adv. Manufacturing Technology, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6057-3> ISSN: 0268-3768 (2014).

### AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a los proyectos en cuyo marco se ha desarrollado la investigación citada en este trabajo, Proyecto Europeo H2020 PARADISE (ID: 723440) y proyecto TURBO (DPI2013-46164-C2-1-R) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España.