

# Laser cladding en 5 ejes continuos para la fabricación de piezas de alto valor añadido

**I. Tabernero Campos, A. Calleja Ochoa, E. Ukar Arrien, L. N. López de Lacalle Marcaide**

*Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco (UPV/EHU)*  
ivan.tabernero@ehu.es

---

*Durante los últimos años el sector aeronáutico se ha convertido en uno de los principales clientes del sector de la máquina herramienta. Así, el alto valor añadido de las piezas de este sector junto con el alto precio del material de partida genera un gran interés en la optimización de los procesos de fabricación e incluso en el estudio de alternativas a estos. El presente artículo estudia la aplicación del proceso de aporte de material mediante láser para piezas complejas del sector aeronáutico. Para ello, se tiene en cuenta todo el proceso de puesta a punto del proceso, desde la obtención de los parámetros a usar, hasta la verificación virtual de las trayectorias en 5 ejes. En primer lugar se obtendrán experimentalmente los parámetros óptimos del proceso en base a la productividad. Posteriormente, se estudiarán las estrategias adecuadas para el tipo de proceso estudiado utilizando un software comercial de CAD/CAM (NX® 7.5). Este punto es de gran interés ya que los softwares de CAM están dirigidos a la sustracción de material del tocho inicial, por lo que el trabajo hará hincapié en los aspectos a tener en cuenta para su utilización en el proceso de aporte de material. Por último, se presenta la etapa de verificación de trayectorias, que si bien en cualquier proceso de mecanizado en 5 ejes es necesario, en el aporte en 5 ejes continuos es indispensable.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las industrias enfocadas a la fabricación de piezas de alto valor añadido, están buscando procesos innovadores que representen una apuesta más económica y sostenible frente a procesos convencionales de fabricación. Dentro de estos nuevos procesos van tomando mayor importancia aquellos basados en la aplicación industrial de la tecnología láser debido a su fácil automatización, a la ausencia de fuerzas y a la rapidez de procesado. Entre ellos, el aporte de material es el que posee una mayor polivalencia, extendiéndose su aplicación desde la generación de recubrimientos hasta la fabricación directa de piezas. Este proceso se basa en la utilización de la alta concentración de energía del haz láser para la creación de un baño de material fundido donde se inyecta el material de aporte, generando así cordones de alta calidad con los que se van formando capas de material, y geometrías 3D capa a capa [1]. De este modo, es posible reducir el alto consumo de material del mecanizado por arranque de viruta, y además, conseguir una reducción de la zona afectada térmicamente en comparación con la soldadura convencional. Las tecnologías de aporte se han usado durante años para la reparación de piezas de alto valor añadido. De este modo, tradicionalmente se han usado de forma manual técnicas de soldadura convencional. Así, en los últimos años la aplicación del laser cladding ha ido tomando importancia gracias a su capacidad de automatización y de la reducida zona afectada térmicamente, lo que genera un gran ahorro económico y unas altas propiedades mecánicas del aporte.

Este proceso se ha utilizado principalmente dentro de la industria del molde y la matriz, para la generación de recubrimientos duros en aceros de herramienta [2], además, en los últimos años se han ido realizando también estos recubrimientos en otro tipo de materiales, como pueden ser las aleaciones de magnesio. En este sentido, el proceso de aporte se ha colocado como una alternativa factible a los métodos tradicionales de endurecimiento superficial como pueden ser la nitruración ó la electrodeposición [3].

Dentro del sector del molde y la matriz, este proceso es capaz de reparar zonas desgastadas alargando la vida útil de estas piezas que poseen un alto coste. En este campo compete básicamente con procesos de soldadura manual como puede ser la soldadura TIG [4]. A su favor, el proceso proporciona la mayor capacidad de automatización que conllevan las tecnologías láser. Siguiendo dentro de este sector la última aplicación estudiada es la fabricación completa de un molde [5], de este modo se presenta una metodología en la que se fabrica una preforma cercana a la geometría final y se realiza un mecanizado de acabado para conseguir las tolerancias requeridas.

Centrando el estudio en el sector aeronáutico, dentro de este se pueden encontrar piezas de muy alto valor añadido que además por lo general, cuentan con cuerpos de espesor pequeño de los que sobresalen geometrías como pueden ser orejetas de sujeción en carcasas de motores o alabes en el caso de rotores. Así, mediante el mecanizado tradicional el desperdicio de material durante la fabricación de estas piezas es muy alto, lo que unido al alto coste de los materiales usados en este sector, hace que el estudio de alternativas sea necesario. En este sentido el laser cladding, al igual que en el sector del molde y matriz, plantea esta alternativa a la soldadura manual TIG. De este modo, también existen estudios de la aplicación de este proceso para la fabricación de alabes de aleaciones de titanio e incluso metodologías teóricas para la fabricación de estos utilizando un esquema de modelización CAD, programación CAM y verificación mediante Ingeniería Inversa [6].

Una vez vista la aplicabilidad de este proceso en la fabricación de componentes aeronáuticos el primer paso a afrontar es la obtención de los parámetros óptimos para cada aplicación concreta. Estos parámetros varían para los diferentes materiales usados en el sector como pueden ser aceros inoxidables [7], aleaciones de Aluminio [8], aleaciones de Titanio [9] ó aleaciones base Níquel [10].

Para la generación o reparación de piezas mediante laser cladding hay que considerar que este proceso requiere de un método híbrido [11] que combine las tecnologías de aporte de material y el posterior mecanizado de la pieza. La aplicación del aporte de material mediante láser se suele llevar a cabo utilizando trayectorias generadas con una estrategia de 3+2 ejes debido a que la generación de trayectorias en 5 ejes continuos resulta de gran complejidad debido a las características del proceso y a la ausencia de software específico para este fin. En el caso de ser piezas de geometría compleja es indispensable hacer uso de 5 ejes continuos tanto para el aporte como para el re-mecanizado [12]. Para ello, en el proceso de aporte de material se deben tener en cuenta una serie de factores que afectan al resultado final de la pieza aportada, siendo de gran importancia desarrollar una trayectoria adecuada para reducir el efecto de la misma en las características mecánicas y metalúrgicas de la pieza. Uno de los factores que limita la calidad de las piezas fabricadas por Laser cladding es la acumulación de tensiones residuales de origen, pudiendo llegar a reducirse al mínimo con la selección de trayectorias de aporte óptimas. Las tensiones térmicas vienen dadas por un desequilibrio en el calentamiento de la superficie. Por lo tanto, si la trayectoria del aporte no es simétrica, repercutirá desfavorablemente en la pieza final. Deben evitarse a toda costa trayectorias con lagunas, optando siempre por una trayectoria lo más continua posible, evitando asimismo pasar dos veces por el mismo punto para evitar la deposición de material adicional que dará lugar a recalentamientos indeseados. El número de encendidos y apagados del laser debe reducirse al máximo y las trayectorias de deposición deben ser lo suficientemente robustas como para ser generadas con independencia de la complejidad de la geometría.

La calidad del aporte depende directamente de las trayectorias de aporte. En el caso de trayectorias que siguen el contorno de la pieza con un cierto offset entre unas trayectorias y otras, es posible que se produzca una relajación de las tensiones residuales antes de realizar la siguiente trayectoria de contorno. Por lo tanto, el estrés inducido se reduce. Aunque es más eficiente que un patrón en zigzag se puede depositar dejando espacios vacíos, lo que llevaría a una trayectoria discontinua no deseada [13].

De esta manera, en este artículo se describen los pasos a seguir para la aplicación industrial del proceso, desde la verificación del material de aporte hasta la obtención de estos parámetros óptimos, pasando por la calibración de equipos, la programación de las

trayectorias de aporte y la verificación virtual de estas para evitar colisiones durante el proceso. De este modo, se presenta una metodología centrada en la fabricación directa de rotores centrifugos de acero inoxidable, pero que se puede extrapolar a la aplicación del proceso de laser cladding a cualquier tipo de pieza compleja que requiera la utilización de 5 ejes continuos.

## 2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES

### 2.1. Equipo y materiales

El trabajo se ha llevado a cabo utilizando un laser de fibra Rofin FLO10 de 1 kW de potencia máxima acoplado a una boquilla coaxial discreta (fig. 1a) diseñada y fabricada en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). El equipo se encuentra instalado en una plataforma de procesamiento láser Kondia Aktinos 500 de 3 ejes que lleva acoplada una mesa tilting que permite el uso de trayectorias en 5 ejes continuos (fig.1b). El material de aporte se inyecta mediante un alimentador SULZER Metco Twin-10C directamente conectado a la boquilla coaxial (fig.1c). Se utiliza como material base una acero inoxidable AISI 304 mientras que para el material de aporte se usa polvo de inoxidable AISI 316L de tamaño de partícula entre 45 y 150  $\mu\text{m}$ . Tanto para el gas de protección como para el de arrastre se utiliza Argón de alta pureza.



Figura 1. a) Boquilla coaxial discreta b) Aktinos-500+Mesa Tilting c) Alimentador SULZER Metco Twin10C

### 2.2. Estudio del material y ajuste de equipos

En todo proceso industrializado se hace necesario un control de todas las variables que puedan afectar a este, y que no necesariamente se traten de parámetros del proceso. Como ejemplo, se presenta en este trabajo un estudio del material de aporte. El primer paso que debe realizarse en un entorno industrial es un control de calidad del material recepcionado. Para ilustrar la necesidad de este control, se ha realizado la comparación de rangos de tamaño de polvo solicitados al proveedor y los obtenidos en un estudio del tamaño de polvo real. Para ello, se han medido mediante un proyector de perfiles dos muestras aleatorias del material consistentes en 50 partículas por muestra (fig. 2a). Se puede observar que dentro del rango ofertado por el fabricante (+45-145  $\mu\text{m}$ ) las partículas se corresponden con el tamaño esperado.

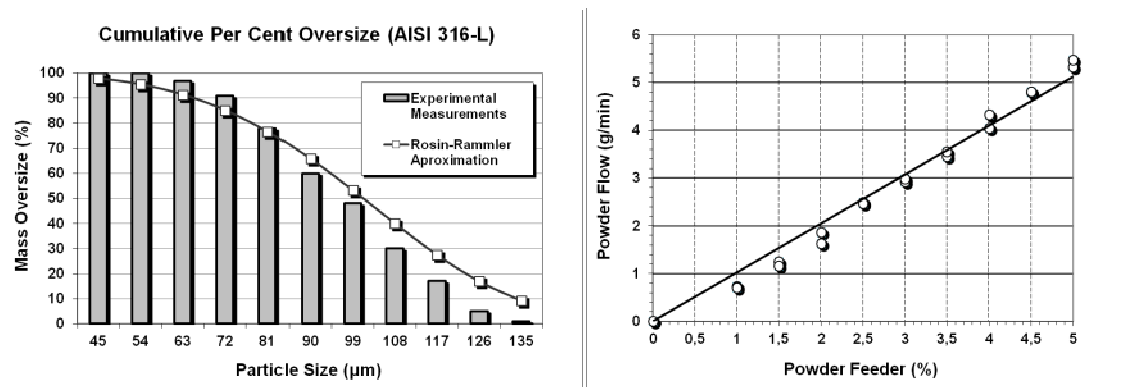


Figura 2. a) Distribución de tamaño de partícula b) Ajuste del alimentador de polvo

Una vez comprobado la validez del material de aporte, es necesario calibrar el equipo de alimentación de polvo para saber la cantidad de polvo que se está inyectando en la zona de aporte. Básicamente el alimentador de polvo se compone de un disco que va girando a una velocidad constante programada donde se deposita el polvo proveniente de una tolva. El polvo del disco llega a un punto donde es arrastrado por una corriente de gas hacia la boquilla coaxial de aporte, a una presión y caudal dados. De este modo, es necesario relacionar el flujo másico de polvo con la velocidad de rotación del disco. Para ello se realizan una serie de ensayos variando la velocidad de giro del alimentador y midiendo mediante una balanza de precisión la masa de polvo inyectada, obteniendo así la curva de calibración del alimentador (fig. 2b).

### 3. METODOLOGÍA DE ELECCIÓN DE PARÁMETROS

Una vez elegido el material de aporte y calibrado el alimentador, es necesario elegir los parámetros óptimos del proceso. Para ello se van a estudiar utilizando un criterio de selección basado en la tasa de aporte. La tasa de aporte se define como la cantidad de material que se deposita para unos parámetros de entrada dados y se calcula a través de la Ecuación 1:

$$\text{Tasa de Aporte (mm}^3/\text{min)} = \text{Avance (mm/min)} \cdot \text{Área Aparente (mm}^2) \quad (1)$$

Donde, el área aparente es un parámetro que se define como el producto de la anchura del cordón por su altura. Este área no coincide con el la sección del cordón pero permite calcular de manera sencilla la tasa de aporte con el objetivo de comparar diferentes combinaciones de parámetros. De este modo, la tasa de aporte se puede calcular a través de de la Ecuación 2:

$$\text{Tasa de Aporte (mm}^3/\text{min)} = \text{Avance (mm/min)} \cdot \text{Altura (mm)} \cdot \text{Anchura (mm)} \quad (2)$$

Una vez establecido el criterio de selección de parámetros se llevan a cabo una serie de ensayos de cordón simple tras los cuales se mide la forma de los cordones. Para ello, se realizan tres secciones del cordón y se mide tanto la anchura como la altura de este. En estos ensayos se van variando los parámetros de entrada del proceso. En este caso se han mantenido fijos los parámetros relacionados con el gas (presión y caudal) y con el polvo (caudal másico), y se han ido variando la potencia, y la velocidad de avance. En la Tabla 1 se muestra la ventana de proceso estudiada.

<b>Caudal de gas protector</b>	12.5 l/min (1bar)
<b>Caudal de gas portador</b>	5.5 l/min (1bar)
<b>Potencia del Láser</b>	600-800-1000 W
<b>Velocidad de Avance</b>	200-400-600 mm/min
<b>Flujo de polvo</b>	2.5 % (2,7 g/min)

Tabla 1. Ventana de proceso de los ensayos realizados.

Los resultados de las mediciones se muestran en la figura 3. Se puede observar que la altura del cordón depende directamente de la velocidad de avance siendo prácticamente indiferente a la variación de potencia. Este hecho se corresponde a que, dado un flujo másico, cuanto más tiempo se permanezca en un punto aportando mayor será la cantidad de polvo que llegue al sustrato, es decir, como se observa en la figura 3a la altura del cordón es mayor para velocidades de aporte bajas. Por su parte, la anchura depende tanto de la potencia como de la velocidad de avance. Esto es debido a que la anchura de cordón aportado está directamente relacionada con el tamaño del baño fundido y por lo tanto de la energía que llega al sustrato. De este modo, a mayor potencia o a menor velocidad de avance la energía es mayor por lo que, como se puede ver en la figura 3b, la anchura del cordón generado es mayor. En cuanto a la tasa de aporte, aunque a velocidades de aporte bajas el cordón tenga una sección mayor no es suficiente para contrarrestar el efecto de la reducción de velocidad. Así, según el criterio de tasa de aporte máxima (fig. 3c), y para el rango de parámetros estudiado, los valores de la potencia y de la velocidad de avance óptimos son 1000 W y 600 mm/min, respectivamente.

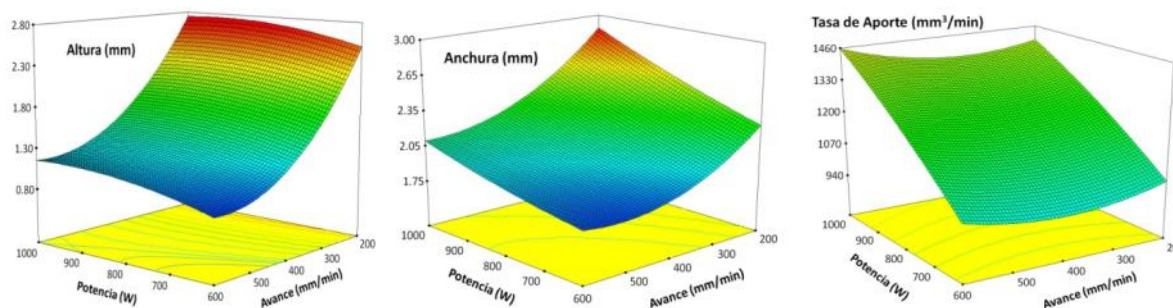


Figura 3. Estudio respecto a los parámetros del proceso a) Altura. b) Anchura. c) Tasa de Aporte.

Una vez elegidos los parámetros que se van a utilizar para el aporte de materia, es necesario un estudio del crecimiento de capa. Aunque este estudio pueda parecer en un principio trivial, es absolutamente necesario ya que al realizar el aporte mediante una boquilla coaxial, tan solo se posee un margen de unos pocos milímetros alrededor del punto de focalización del material inyectado donde el aporte es eficaz. Así, si entre capa y capa la cantidad que se levanta el cabezal es mayor o menor que la que realmente crece el aporte, se introduce un desfase entre estas dos alturas, que si bien en ensayos de cordones simples no es importante, en fabricación de piezas reales donde son necesarios aportes masivos, y sobre todo en aportes realizados en 5 ejes, este desfase puede hacer que no se trabaje dentro de la zona adecuada, lo que provoca un crecimiento irregular de la pieza. El ensayo ejecutado es sencillo, se realizan dos ensayos de tres capas cada uno para diferentes variaciones del eje Z por capa. De este modo se puede ir midiendo la altura alcanzada tras cada capa obteniendo el valor óptimo para este parámetro.

Incremento de altura de Cabezal por Capa ( $\Delta Z$ en el programa CNC)															
Medidas en 3 puntos del cordón de aporte	0,1 mm			0,2 mm			0,3 mm			0,4 mm			0,5 mm		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Total medido tras 3 primeras capas	0,55	0,54	0,59	0,54	0,49	0,53	0,50	0,46	0,52	0,52	0,45	0,52	0,47	0,46	0,45
$\Delta Z$ por capa	0,18	0,18	0,20	0,18	0,16	0,18	0,17	0,15	0,17	0,17	0,15	0,17	0,16	0,15	0,15
Altura Media	0,56			0,52			0,49			0,49			0,46		
$\Delta Z$ media	0,19			0,17			0,16			0,16			0,15		
Total medido tras 6 capas	0,97	0,81	0,97	1,00	0,93	1,02	0,97	0,95	0,94	0,89	0,88	0,92	0,95	0,79	0,88
$\Delta Z$ por capa	0,14	0,09	0,13	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,14	0,12	0,14	0,13	0,16	0,11	0,14
Altura Media	0,92			0,98			0,95			0,90			0,87		
$\Delta Z$ media	0,12			0,15			0,15			0,13			0,14		
	<b>0,15</b>			<b>0,16</b>			<b>0,16</b>			<b>0,15</b>			<b>0,15</b>		

Tabla 2. Tabla resumen de los ensayos realizados para estudiar la altura de capa depositada.

Como se puede observar en la Tabla 2 el valor que menos desfase introduce entre el crecimiento de capa y la variación de la altura del cabezal es el de 0.2 mm, ya que teniendo en cuenta una zona óptima de aporte de 4 mm, esto permite la realización de más de 100 capas antes de salirse de esta zona.

#### 4. PLANIFICACIÓN Y VERIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS

Finalmente, cuando ya se han obtenido todos los parámetros necesarios para la puesta a punto del proceso se ha estudiado una geometría típica en el sector aeronáutico. Se trata de un álabe de un compresor centrífugo (Fig. 4), que básicamente coincide con el tipo geometría que se quiere estudiar en este artículo, un saliente de espesor en un cuerpo central.



Figura 4. a) Croquis de la pieza a fabricar. b) Trayectorias de aporte c) Acabado del álabe.

La estrategia a seguir para la fabricación de la pieza se compone de una etapa inicial de preparación de la preforma de partida mediante torneado hasta conseguir la superficie sobre la que se debe aportar el álabe. A continuación, una fase de aporte donde se genera una preforma sobre la que en una tercera etapa se le realizará un mecanizado de acabado. En la etapa de aporte se realiza una estrategia capa a capa en 5 ejes que seguirá la superficie de contorno del álabe con un cierto sobre-espesor para posteriormente mediante una operación de acabado eliminar el material sobrante hasta obtener la forma buscada.

Estas trayectorias deben ser post-procesadas para las características concretas del proceso y de la máquina utilizada (3+2 ejes continuos). Para ello, partiendo de un post-procesador para mecanizado basado en código ISO (Fagor® 8070), se han introducido las modificaciones específicas para el aporte de material. Estas modificaciones son básicamente dos, la activación y desactivación del láser, y el suavizado de esquinas para evitar paradas en los cambios de dirección, evitando así aportes excesivos en estas zonas.

Una vez obtenidas las trayectorias de aporte es necesaria una verificación de las posibles colisiones que se puedan producir durante el proceso. Esta etapa de verificación es necesaria en cualquier mecanizado de 5 ejes, pero cobra mayor importancia en el proceso de aporte de material ya que los espacios son reducidos y la restricción de perpendicularidad respecto a la superficie aumenta las probabilidades de colisión. En primer lugar, debido a que no se trata de una plataforma estándar, es necesario modelizar de forma gráfica la máquina junto con el cabezal multiproceso. Para ello, se generan los archivos de CAD de cada elemento de la máquina que se utilizarán posteriormente en el verificador de trayectorias (VERICUT® 7.5). Con la máquina introducida en el software de verificación es indispensable definir una herramienta que se asemeje al spot láser, en este caso se ha utilizado una herramienta de forma cónica con las dimensiones del haz. Por último, se introduce el programa CNC en el verificador virtual para la comprobación previa de posibles colisiones. En la figura 5 se puede observar tanto el entorno de verificación con la máquina modelizada (a), como un detalle de las verificación de las trayectorias de aporte (b).

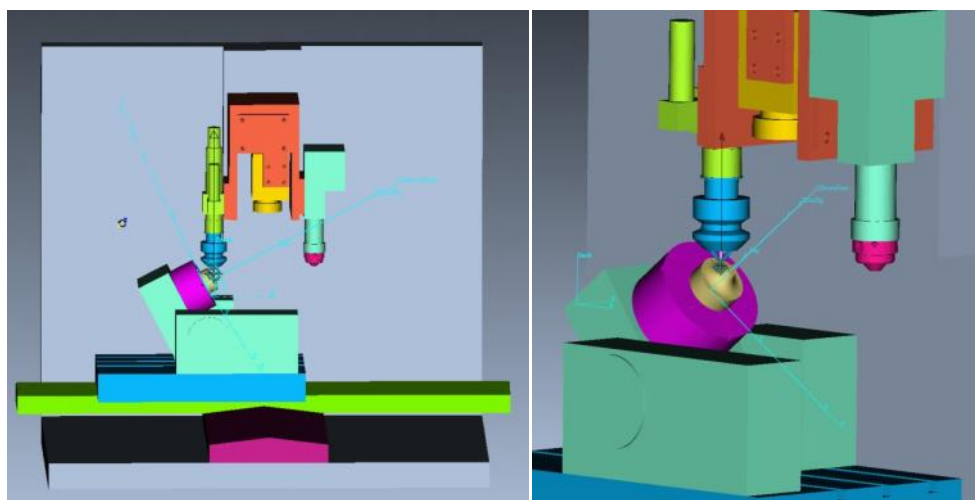


Figura 5. a) Máquina en el entorno de VERICUT®. b) Proceso de Verificación

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una alternativa al mecanizado tradicional de piezas del sector aeronáutico. Estas piezas se caracterizan por poseer un cuerpo de espesor reducido de donde sobresalen geometrías generalmente complejas. Así, hasta el momento la manera de ejecutar estas piezas es partir de un bloque de material de donde se va arrancando material hasta conseguir la geometría deseada. Este método de fabricación lleva implícito un gran desperdicio de material en forma de viruta, por lo que en este artículo se presenta el proceso de laser cladding como alternativa a este mecanizado. Este proceso se basa en la creación de un baño fundido en la superficie de la pieza donde se inyecta un material de aporte, generando así una capa de material íntimamente ligada con el material base. De esta manera, capa a capa se va generando la geometría deseada con un aprovechamiento del material mucho mayor.

En este artículo se presenta paso a paso el proceso realizado para la aplicación industrial en piezas reales del proceso. En primer lugar se identifican los parámetros más importantes del proceso, y se desarrolla la metodología necesaria para el ajuste de equipos. Después se eligen los parámetros óptimos para el proceso definiendo para ello dos criterios, la tasa de

aporte y la eficiencia másica. Por último, se aplica un proceso de verificación virtual de trayectorias para evitar posibles colisiones entre los diferentes elementos durante el proceso. De este modo, se presenta una completa metodología para la aplicación del proceso de aporte láser en la fabricación de piezas de alto valor añadido mediante trayectorias en 5 ejes continuos.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo aquí presentado se ha financiado por el Gobierno Vasco, en concreto desde su convocatoria Eortek, el cual se ha canalizado a través del CIC Margune. Desde estas líneas se desea agradecer el esfuerzo realizado en la financiación del proyecto.

## 7. REFERENCIAS

- [1] E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin. *Laser Cladding*, CRC Press LLC (2005).
- [2] C. Navas, A. Conde, B.J. Fernández, F. Zubiri, J. Damborenea, *Laser coatings to improve wear resistance mould steel*, *Surface & Coatings Technology* 194 (2005) 136-142.
- [3] A.S. Khanna, S. Kumari, S. Kanungo, A. Gasser, *Hard coatings based on thermal spray and laser cladding*, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* (2008).
- [4] W.-T. Preciado, C. E. Niño Bohórquez, *Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels*, *Journal of Materials Processing Technology* 179 (2006) 244-250.
- [5] J.-Y. Jeng, M.-Ch. Lin, *Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling*, *Journal of Materials Processing Technology* 110 (2001) 98-103.
- [6] J. Gao, X. Chen, O. Yilmaz, N. Gindy, *An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction*, *International Journal Advance Manufactured Technology* 36 (2008) 1170-1179.
- [7] A.J. Pinkerton, L. Li, *Multiple-layer cladding of stainless steel using a high-powered diode laser: an experimental investigation of the process characteristics and material properties*, *Thin Solid Films* 453-454 (2004) pp. 471-476.
- [8] G. Chryssolouris, S. Zannis, K. Tsirbas, C. Lalas, *An experimental investigation of laser cladding*, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Volume 51, Issue 1(2002) 145-148.
- [9] K.-H. Ritcher, S. Orban, S. Nowotny, *Laser cladding of the Titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades*, *Proceedings of 23rd ICALEO* (2004).
- [10] C. Paul, P. Ganesh, S.K. Mishra, P. Bhargava, J. Negi, A.K. Nath, *Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components*, *Optics & Laser Technology* 39 (2007) 800-805.
- [11] K. Eiamsa-ard, H. Janardanan Nair, L. Ren, J. Ruan, T. Sparks, F.W. Liou, *Part Repair using a Hybrid Manufacturing System*, *SFF Symposium* 2005.
- [12] J. Ruan, K. Eiamsa-ard, F.W. Liou; *Automatic Process Planning and Toolpath Generation of a Multiaxis Hybrid Manufacturing System*, *Journal of Manufacturing Processes* 7 1 2005.
- [13] L. Ren, T. Sparks, J. Ruan, F. Liou, *Process Planning for a Multiaxis Hybrid Manufacturing System*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 132 021006-1 2010.