Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea
BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

APLICACIÓN DEL APORTE POR LÁSER APLICADO EN ALEACIONES DE TITANIO

Alumno/Alumna: Aperribai Urkidi, Mikel

Director/Directora: Lamikiz Mentxaka, Aitzol

Curso: 2018-2019

Fecha: 15 de julio de 2019

DATOS BÁSICOS DEL PROYECTO

Alumno: Mikel Aperribai Urkidi

Director del proyecto: Aitzol Lamikiz Mentxaka

Departamento: Ingeniería Mecánica

Título del proyecto: Aplicación del aporte por láser aplicado en aleaciones de titanio.

Plazo de ejecución: 15/10/2018 a 15/07/2019

Laburperna: Laser bidezko prozesu gehigarria edo *Laser Metal Deposition (LMD)*, geometria konplexuak eta metalurgikoki kalitate altuko piezak egitea ahalbidetzen duen fabrikazio gehigarrizko prozesua da. Teknologia honen bidez, material zailekin lan egin daiteke, beste metodo batzuekin ezinezkoa edo oso zaila izanik. Prozesu honek, parametro askoren ikasketa eta kontrola behar du. Bertan, laser baten bidez, gehitutako materiala urtzen da oinarriaren gainean, gainazal fin bat sortuz. Material hau, hauts moduan gehituko da, espezialki diseinatutako mutur (nozzle) baten bidez, laserrak oinarria berotzen duen puntuan. Proiektu honen helburu nagusia, gehitutako kordoien ezaugarriak ezagutzea da, Ti-6A-l4V-arekin lan egiteko parametro hoberenak adieraziz. Laser bidezko prozesu hau baliagarria dela erakusteko alabe moduko pieza bat eraikiko da metodo honen bidez. Azkenik, kordoien eta alabearen propietate mikroskopikoak aztertuko dira.

Hitz gakoak: Laser, alabe, kordoi, garraio gasa, babes gasa, monokordoi estrategia, fabrikazio gehigarria, titanioa.

Resumen: El proceso de aporte por láser o *Laser Metal Deposition (LMD)* es un proceso de fabricación aditiva que permite la fabricación de piezas con geometrías complejas y alta calidad metalúrgica. Esta tecnología permite trabajar con materiales difíciles de tratar con métodos tradicionales de arranque de viruta. Es un proceso que requiere del estudio y control de una gran variedad de parámetros. En él, se utiliza un láser para fundir una fina capa de material aportado en un sustrato móvil. Este material se suministra en forma de polvo a través de una boquilla (nozzle) coaxial que proporciona un caudal de polvo en el punto donde funde el láser. El objetivo de este proyecto es determinar las características de cordón óptimas para aportar con una aleación de titanio Ti-6Al-4V y demostrar la viabilidad de este método mediante un álabe de geometría compleja como pieza test. Para ello se analizarán las propiedades microscópicas de los aportes.

Palabras clave: Láser, álabe, cordón, gas de arrastre, gas de protección, estrategia monocordón, fabricación aditiva, titanio.

Abstract: *Laser Metal Deposition (LMD)* is an additive manufacturing process that enables to build free-form parts with no geometrical restriction and high quality metallurgy. This technology allows working with materials whose manufacturing with other methodologies would be very difficult. This process requires the study and control of a wide range of parameters. The LMD uses a laser heat source to mil a thin layer of a desired material on a moving substrate. The deposited material will be transfered to the substrate with an injection nozzle, whose objective is to send the titanium powder to the heat point. The principal objective of this project is to analyze the features of the cord and determinate the best condition for the addition of Ti-6Al-4V. Moreover, to demonstrate de viability of this technology creating a hollow blade like a test piece. To prove that, the microscopical properties of the cords and the blade will be analyzed.

Keywords: Laser, blade, cord, carrier gas, shielding gas, monocord strategy, additive manufacturing, titanium.

Índice

1. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos 3
1.1 Tablas 3
1.2 Ilustraciones 3
1.3 Acrónimos 4
2. Introducción 5
3. Objetivos 6
4. Alcance 7
5. Estado del Arte 8
5.1 LMD Láser Metal Deposition 8
5.2 Descripción de equipos y materias primas 12
6. Metodología 21
6.1 Preparación previa 21
6.2 Realización de aportes 23
6.3 Caracterización del material 24
6.4 Corte del sustrato con los aportes 25
6.5 Encapsular las piezas 25
6.6 Lijar y pulir las probetas 26
6.7 Microscopía 28
6.8 Análisis de la microscopía 30
6.9 Aporte del álabe de Ti-6Al-4V 33
7. Descripción de tareas. Diagrama de Gantt 44
8. Presupuesto 46
9. Análisis de Riesgos 48
9.1 Riesgos en cuanto a objetivos 48
9.2 Riesgos en los materiales 49
9.3 Riesgos en las máquinas 49
10. Conclusiones 51
11. Bibliografía 52
12. Anexos 53
12.1 Anexo I 53

1. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos

1.1 Tablas

Tabla 1: Características de los aportes 31
Tabla 2: Parámetros y características del cordón 33
Tabla 3: Costes de recursos humanos 46
Tabla 4: Coste de amortizaciones 46
Tabla 5: Coste de gastos 46
Tabla 6: Presupuesto final 47
Tabla 7: Análisis de riesgos de objetivos 48
Tabla 8: Análisis de riesgos en materiales 49
Tabla 9: Análisis de riesgo en las máquinas 50

1.2 Ilustraciones

Ilustración 1: Aporte por láser 8
Ilustración 2 : Fabricación de álabes mediante aporte por láser 9
Ilustración 3 : Turbina Rolls-Royce 10
Ilustración 4: Análisis químico del Ti-6Al-4V 10
Ilustración 5: Propiedades del Ti-6Al-4V 10
Ilustración 6: Etapas de un turborreactor 11
Ilustración 7: Etapas de una turbina Aircraft 12
Ilustración 8: Generador Rofin FL010 13
Ilustración 9: Generador láser 13
Ilustración 10: Etapas del colimador 14
Ilustración 11: Refrigerador KKT Kraus OLB-5 14
Ilustración 12: Mesa de posicionamiento X-Y 15
Ilustración 13: Kondia Aktinos 500 16
Ilustración 14: Boquilla coaxial del láser 17
Ilustración 15: Bombonas de gas Argón y Helio 18
Ilustración 16: Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V 18
Ilustración 17: Reactor de propulsión del motor de un avión 19
Ilustración 18: Ti-6Al-4V en polvo 20
Ilustración 19: Sultzer Metco Twin 10-C Powder Feeder 20
Ilustración 20: Taller de Mecánica 21
Ilustración 21: Sierra metalográfica 22
Ilustración 22: Disco de corte para titanio 22
Ilustración 23: Rectificadora 23
Ilustración 24: Proceso de aporte 24
Ilustración 25: Encapsuladora 26
Ilustración 26: Pulidora 27
Ilustración 27:Lijas de diamante reutilizables 27
Ilustración 28: Paños de pulido y aerosoles de diamante 28
Ilustración 29: Microscopio Leica DCM 3D 29
Ilustración 30: Microscopía de diferentes cordones 29
Ilustración 31: Características del aporte 30
Ilustración 32: Características óptimas del cordón 31
Ilustración 33: Microscopía del solape Ti_AA_53_30 32

Ilustración 34: Microscopía del solape Ti_AA_53_40 32
Ilustración 35: Características del cordón seleccionado 33
Ilustración 36: Diseño del primer ensayo 34
Ilustración 37: Pieza ensayo 1 34
Ilustración 38: Crecimiento desigual 35
Ilustración 39: Defecto de inicio-final 35
Ilustración 40: Oxidación 35
Ilustración 41: Diseño del segundo ensayo 36
Ilustración 42: Pieza ensayo 2 36
Ilustración 43: Defectos de la pieza 2 37
Ilustración 44: Pieza ensayo 3 38
Ilustración 45: Defectos de la pieza 3 39
Ilustración 46: Pieza ensayo 4 40
Ilustración 47: Defectos pieza 4 40
Ilustración 48: Pieza final 41
Ilustración 49: Primer corte 42
Ilustración 50: Segundo corte y encapsulado de la pieza 42
Ilustración 51: Probeta pulida y atacada 43
Ilustración 52: Zona bicordón inferior 43
Ilustración 53: Zona bicordon superior 43

1.3 Acrónimos

LMD: Método de aporte por láser (Laser Metal Deposition).
CAD/CAM: Diseño asistido por computadora (Computer-Aided Design).

2. Introducción

A lo largo de los años, los procesos de fabricación más comunes o más conocidos para conseguir una pieza de una geometría concreta, han sido los procesos de arranque de viruta. Mediante estos métodos, partiendo de un material en bruto, se procede a ir arrancando el material sobrante poco a poco hasta llegar finalmente a la geometría de la pieza deseada. En cambio, estos últimos años se han ido desarrollando otro tipo de tecnologías capaces de crear una pieza añadiendo material a una base denominada sustrato. Estos procesos son conocidos como procesos de fabricación aditiva y son opuestos a los mencionados anteriormente, ya que estos añaden material en vez de quitarlo. Los procesos de fabricación aditiva, no solo se limitan a la creación de piezas, también se pueden utilizar para reparaciones de diferentes geometrías, fabricadas por el mismo método o por otro tipo de proceso. De esta manera, es una tecnología que aporta una gran flexibilidad debido a la variedad de operaciones que se pueden llevar a cabo.

Entre los procesos de fabricación aditiva se encuentra el láser cladding (LMD) o aporte por láser. Es una tecnología en proceso de desarrollo que tiene un gran interés en la reparación de piezas de alto valor añadido y difícil fabricación como pueden ser los álabes de una turbina.

El proceso de fabricación se puede realizar de varias maneras, aunque en todas ellas se utiliza el láser como fuente de calor para fundir el material inyectado o aportado con el sustrato. Hay varios métodos para realizar el aporte: mediante inyección de polvo, alimentación mediante un hilo de material a fundir o situando el polvo en el sustrato antes de poner en marcha el láser. De todos estos métodos, el método de inyección de polvo ha demostrado ser el más efectivo y, por tanto, es el que se va a usar en este proyecto. A lo largo del proceso, este polvo es suministrado mediante un flujo de gas denominado gas de arrastre, con el objetivo de trasladar el polvo desde su alimentador hasta el punto del aporte. Por otro lado, también se suministra otro gas denominado gas de protección, con la misión de crear una atmósfera inerte para proteger el aporte de posibles reacciones que puedan generarse, como por ejemplo la oxidación [1].

Mediante este método, se puede trabajar con diferentes aleaciones de metales en polvo, pudiendo crear capas de materiales diferentes para mejorar las propiedades de una pieza en zonas concretas. Por otro lado, permite trabajar con materiales que debido a sus características son difíciles de mecanizar. En este caso, en el proyecto llevado a cabo se utiliza el mismo material tanto para el sustrato como para el aporte, que son ambos de titanio Ti-6Al-4V. Este material es una superaleación muy interesante en la industria aeronáutica por las propiedades mecánicas que proporciona a altas temperaturas, y el peso que tiene.

Además de las ventajas mencionadas, el LMD cuenta con más funciones que le hacen destacar como la reducción de tiempo de producción, ya que se lleva el diseño directamente desde el diseño CAD/CAM a la pieza sólida. También ofrece la posibilidad de crear geometrías imposibles de realizar por métodos de arranque de viruta. Por otro lado, es una tecnología que encuentra un punto débil en el coste que supone utilizarla, ya que los equipos necesarios requieren una gran inversión. Además de los equipos, los materiales utilizados también son de alto valor ya que tanto los gases como los materiales en polvo tienen un coste a tener en cuenta [1].

3. Objetivos

El principal objetivo a lograr en este proyecto, es estudiar la versatilidad y las ventajas que proporciona el método de aporte por láser, dando la posibilidad de utilizar superaleaciones como el Ti-6Al-4V difíciles de trabajar con otros métodos.

Se demostrará que el LMD es válido para realizar aportes de geometrías complejas que se puedan utilizar tanto para reparaciones de elementos como para la fabricación de piezas.

Se realizarán ensayos para determinar las características de los cordones de aporte de Ti-6Al-4V, analizando su microestructura y dando por válidos aquellos que cumplan los requisitos establecidos.

Se creará una pieza en forma de álabe, dotada de una geometría compleja, con una estrategia monocordón, seleccionando los parámetros adecuados obtenidos en la etapa anterior. Este álabe servirá como demostración del objetivo principal, ya que mediante esta pieza se quiere demostrar la capacidad del LMD para realizar aportes de geometría compleja con materiales difíciles de trabajar.

Se proporcionará un presupuesto del coste de los ensayos, junto a una tabla de análisis de riesgos y la planificación del proyecto a lo largo del tiempo en el que se ha llevado a cabo su ejecución.

Finalmente se expondrán los resultados de ambos ensayos y se argumentarán las conclusiones del estudio, proporcionando al lector una idea de las posibilidades que ofrece la tecnología de aporte por láser.

4. Alcance

Durante el transcurso de los diferentes ensayos, se utilizará un láser de fibra Rofin FL010 con una potencia máxima de 1000 W, una longitud de onda de λ=1080±10ηm una distancia focal de 200mm y un diámetro de 1.6mm en el spot. Este generador láser será utilizado en un centro de procesamiento láser Kondia Aktinos 500, un centro de mecanizado adaptado para el actual uso de porte por láser. Esta máquina dispone de una mesa de posicionamiento de dos ejes con posibilidad de añadir dos grados de libertad angulares mediante un plato giratorio y un eje vertical donde se sitúa la boquilla.

Como alimentador de polvo se empleará un Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder, un alimentador por gravedad con dos tolvas que aporta la posibilidad de alimentar hasta dos polvos al mismo tiempo. En este proyecto se usará solo uno de ellos, alimentado con Ti-6Al-4V.

Para la caracterización de material, se realizarán 32 cordones, variando parámetros como la potencia del láser (W) de, la ratio de alimentación de polvo (mm/min) y la cantidad de polvo introducido (g/min). En el aporte de titanio es necesario contar con una atmósfera protectora para evitar la oxidación a lo largo del proceso. Para ello se tratará de inertizar la zona del aporte con un gas de protección, que en este caso será Argón.

Los cordones se aportarán de 4 en cuatro para optimizar el espacio del sustrato, variando la potencia entre 300-500-700-900 (W), la ratio de alimentación de polvo entre 200-500-800-1200 (mm/min) y la cantidad de polvo entre 2-3-4 (g/min).

Una vez se han obtenido los cordones se analizará la microestructura para determinar la calidad de los mismos y determinar cuál de ellos puede proporcionar una capa uniforme y sin defectos. Finalmente, se elegirá el cordón que presente mayor uniformidad y estabilidad, que sea capaz de formar capas sin grietas y cuyo ángulo de mojado sea menor de 28º.

Habiendo elegido el cordón con las mejores características de aporte se procederá a la fabricación del álabe capa por capa. Para la selección del diseño del álabe, se ha realizado un estudio previo para ver cuáles son los diseños más utilizados en el sector aeroespacial para los álabes de un compresor de turbina, para que los resultados puedan compararse con casos reales de álabes de turbinas.

Para la realización del ensayo se utilizará una potencia de 700 W en el láser, con un avance de 800 (m/min). Partiendo de un sustrato de titanio, se realizarán varios aportes por capas idénticas entre sí, adaptando la distancia de boquilla a sustrato en función de la altura crecida hasta una altura de 70mm. La altura por capa variará a medida que se aporten más capas. El aporte comenzara a girar un ángulo a partir de la décima capa. La potencia del láser y el avance también se irán corrigiendo a medida que se realicen los diferentes ensayos. Se obtendrá la microestructura del álabe y se analizarán la calidad del solape entre cordones, la uniformidad de la estructura y la estabilidad. Por otro lado, se evaluará la oxidación producida en distintas zonas a lo largo del aporte. El ensayo se volverá a repetir corrigiendo los parámetros de manera adecuada para intentar, dentro de lo posible, que estos defectos no vuelvan a producirse o reducirlos hasta que el resultado obtenido sea aceptable.

5. Estado del Arte

5.1 LMD Láser Metal Deposition

El LMD o revestimiento por láser, es una tecnología que, mediante un láser, diseño informático (CAD/CAM), robots, sensores y control y polvo metálico, logra depositar una fina capa del material deseado sobre un sustrato que se mueve. Hay varios métodos para realizar este aporte como son la inyección de polvo, alimentación mediante un hilo de material a fundir o situando el polvo en el sustrato antes de poner en funcionamiento el láser. Se ha demostrado que, de estos, el método más efectivo es el de inyección de polvo y, por tanto, es el que se va a utilizar en este proyecto. De la misma forma, hay varias maneras de inyectar el polvo, como la inyección lateral o la coaxial. Para este proyecto, se va a utilizar una boquilla especialmente diseñada para optimizar el proceso, que utiliza un método de inyección de polvo coaxial [1].

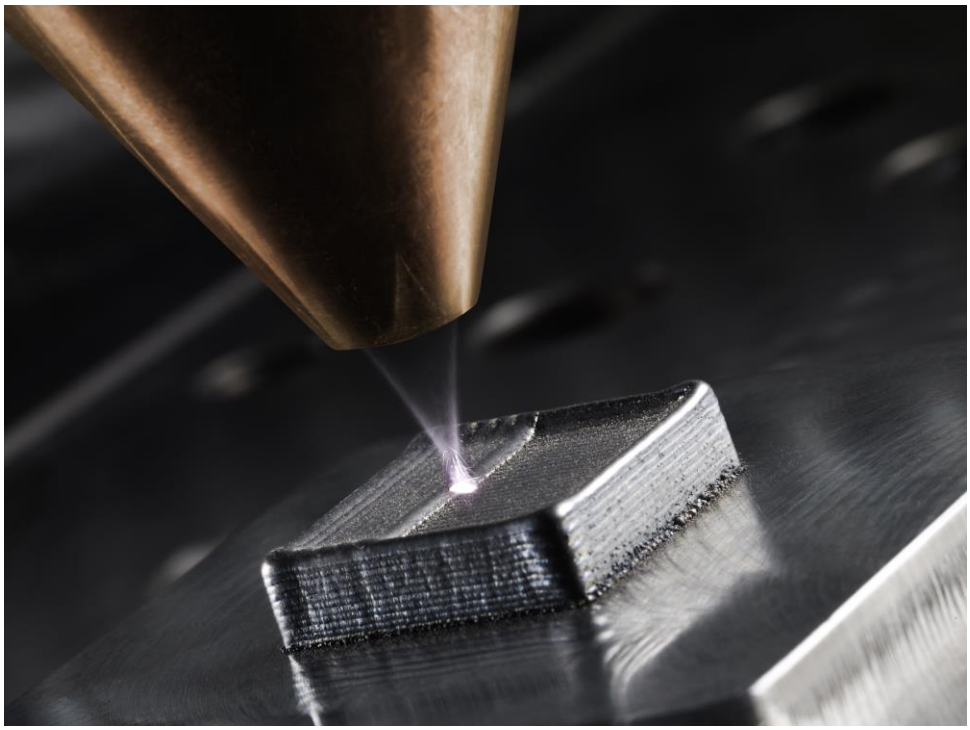


Ilustración 1: Aporte por láser

A lo largo del proceso, el polvo se suministra mediante un gas de arrastre a la boquilla que, a su vez, añade un gas de protección para crear una atmósfera protectora alrededor del aporte y aislarlo del oxígeno del aire ambiente, para que no se forme una capa de óxido en el material aportado. Este gas suele ser un gas inerte, como el Argón o el Nitrógeno y cae sobre la superficie fundida formando una especie de campana protectora.

Esta tecnología de aporte por láser está adquiriendo un mayor interés estos últimos años en la industria, por su versatilidad y capacidad de generar geometrías complicadas para otros métodos de fabricación. Además, proporciona la posibilidad de trabajar con diferentes materiales como aleaciones de acero y superaleaciones de titanio o níquel. Esta versatilidad se debe a que además de utilizar esta tecnología para la fabricación, también se puede utilizar para la reparación de piezas de alto valor añadido que, de otra manera, se tendrían que volver a fabricar, suponiendo un alto coste a la empresa.

Las ventajas del aporte por láser respecto a otros procesos como pueden ser la soldadura por arco o la pulverización de plasma, son un revestimiento mucho mejor con una distorsión mínima y una superficie con un acabado notablemente superior. Además de las anteriormente mencionadas, la tecnología Laser Metal Deposition proporciona:

- Reducción del tiempo de producción: El aporte por láser ofrece la opción de fabricar herramientas y prototipos directamente del modelo CAD al modelo sólido.
- Mejora del control de temperatura: El rápido calentamiento y enfriamiento que ocurre en el proceso tiene efecto sobre el material base, pero las propiedades de este sustrato son modificadas solamente alrededor del aporte.
- Reparación de partes: Esta tecnología puede ser utilizada como método de reparación de superficies de piezas de alto valor añadido, especialmente en zonas críticas de superficies en contacto.
- Producción de partes de varios materiales: Ofrece la posibilidad de inyectar diferentes tipos de material a lo largo del proceso de fabricación si las solicitaciones de la pieza requieren que esta tenga unas propiedades concretas en zonas diferentes.

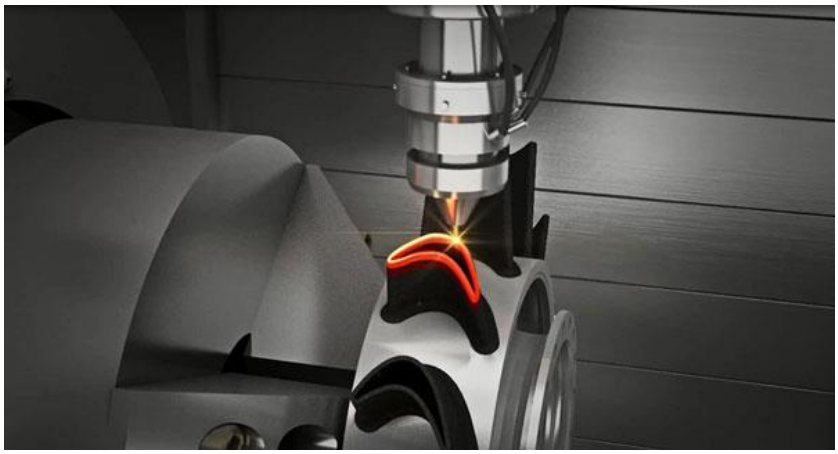


Ilustración 2 : Fabricación de álabes mediante aporte por láser

A lo largo del proceso de aporte, se utilizan gases inertes para evitar que el sustrato reaccione o se oxide, como el Argón, el Nitrógeno o el Helio. El Nitrógeno es uno de los más utilizados ya que es muy económico comparándolo con el Argón, pero en este caso no se va a poder utilizar debido a que reacciona con el titanio, material elegido para este proyecto. Por eso se ha optado por utilizar Argón, tanto para el gas de arrastre como para el gas de protección. Este gas supone un coste económico mayor, pero es el que mejores propiedades ofrece para llevar a cabo el aporte ya que es parecido al Helio y es más barato que este, debido a la escasez del gas y su alto consumo en aplicaciones de alta tecnología [3].

El precio del Argón es especialmente alto por su forma de extracción. El aire de la atmósfera se licua y se destila fraccionadamente. El compuesto rico en Argón se vuelve a destilar para eliminar el Nitrógeno y el hidrógeno, logrando un Argón de alta pureza que contiene solamente unas pocas partes por millón de impurezas [2].

Se usará como sustrato el titanio. Su uso en procesos aditivos es complejo debido a su tendencia a oxidarse con el aire que rodea el aporte. Por otro lado, es un material muy utilizado en la industria aeroespacial para la fabricación de partes de turbinas por sus propiedades. El titanio es el elemento metálico que posee la mayor proporción de dureza-densidad. Un elemento muy utilizado por su alta proporción de tensión de rotura, alta resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga, capacidad de soportar altas temperaturas sin deformarse y su peso. Su punto de

fusión es relativamente alto, sobre los 1650 °C, lo que hace que sea útil como metal refractario. Es paramagnético y presenta baja conductividad eléctrica y térmica.

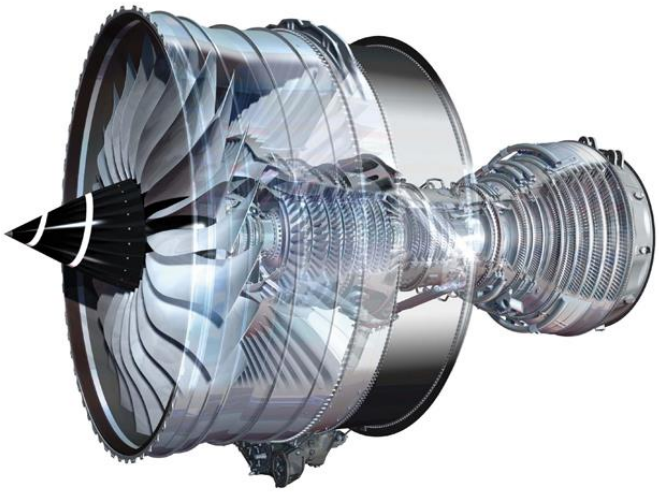


Ilustración 3 : Turbina Rolls-Royce

Para la industria aeroespacial, se requiere de los materiales presenten baja fricción y alta resistencia, estabilidad en temperaturas altas y choque térmico, baja emisión de gases en condiciones de alto vacío y aislamiento eléctrico de un amplio rango de temperaturas y de altos voltajes. El titanio en aleación cumple con estas propiedades y por eso su uso en elementos aeroespaciales es capaz de mejorar la seguridad y rendimiento pese al alto coste que supone.

La aleación de titanio que se utilizará en este proyecto es la aleación Ti-6Al-4V. Es una aleación de titanio-aluminio-vanadio desarrollada para aplicaciones ligeras y de alta resistencia en el mercado aeroespacial. Presenta una combinación de alta solidez, resistencia a la corrosión y bajo peso. Es la relación resistencia-peso la característica más notable por la que se utiliza en el sector aeroespacial [9].

%	C	N	O	H	FE	TI	AL	V
Min	-	-	-	-	-	Balance	5.5	3.5
Max	0.08	0.05	0.2	0.125	0.4	Balance	6.75	4.5

Ilustración 4: Análisis químico del Ti-6Al-4V

Densidad:	4.429 g/cm³
Rango de fusión:	1609 - 1660 °C
Transición a la fase beta:	996 ± 28 °C
Resistencia a la corrosión:	PREN (PREN = %Cr + 3.3x%Mo + 16x%N)

Ilustración 5: Propiedades del Ti-6Al-4V

La turbina, es un dispositivo mecánico rotativo, también conocido como motor a reacción. Toma energía del flujo de un fluido y la convierte en trabajo mecánico al hacer pasar el flujo a través

de los álabes unidos a un eje rotativo conocido como rotor. Hay varios tipos de turbinas usadas en el sector aeroespacial como, por ejemplo, turborreactores, turboventiladores y turbohélices.

Los turborreactores están compuestos por una entrada de aire, un compresor de flujo axial, una cámara de combustión, una turbina de gas y una tobera. El aire entra pasando por los álabes del compresor, lo que genera una disminución de velocidad y, en consecuencia, un aumento de la presión. Para lograr un mayor aumento de la presión, el compresor se divide en 10 y 15 etapas generalmente. Después de estas etapas, el aire comprimido entra a la cámara de combustión para mezclarse con el combustible y, una vez mezclado, calentarse y quemarse. A continuación, los gases de combustión pasan a través de los álabes de la turbina expandiéndose y comenzando el aumento de velocidad de los mismos. Este flujo hace girar al rotor, transmitiendo el movimiento al compresor a través del eje que lo une a la turbina, proporcionando la energía necesaria. Para generar el empuje necesario para mover el avión, los gases son expandidos en una tobera, logrando así la velocidad deseada.

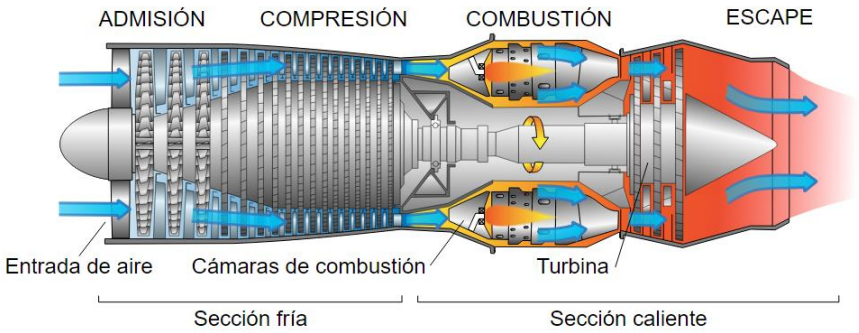


Ilustración 6: Etapas de un turborreactor

Dentro de un motor aeroespacial, el titanio o las aleaciones de titanio se utilizan en los álabes que forman el compresor del motor. Estos álabes se encargan de bajar la velocidad del fluido y aumentar su presión a lo largo de sus etapas. Para eso, se necesita un material con una densidad relativamente baja y capaz de soportar temperaturas de trabajo entre 450-600 °C, sin ver afectadas sus propiedades mecánicas. Una vez transcurrida la etapa de compresión, los requisitos cambian ya que en la turbina las temperaturas alcanzadas son mucho más altas, superando los 1500 °C y el material comúnmente utilizado es el níquel o aleaciones base níquel.

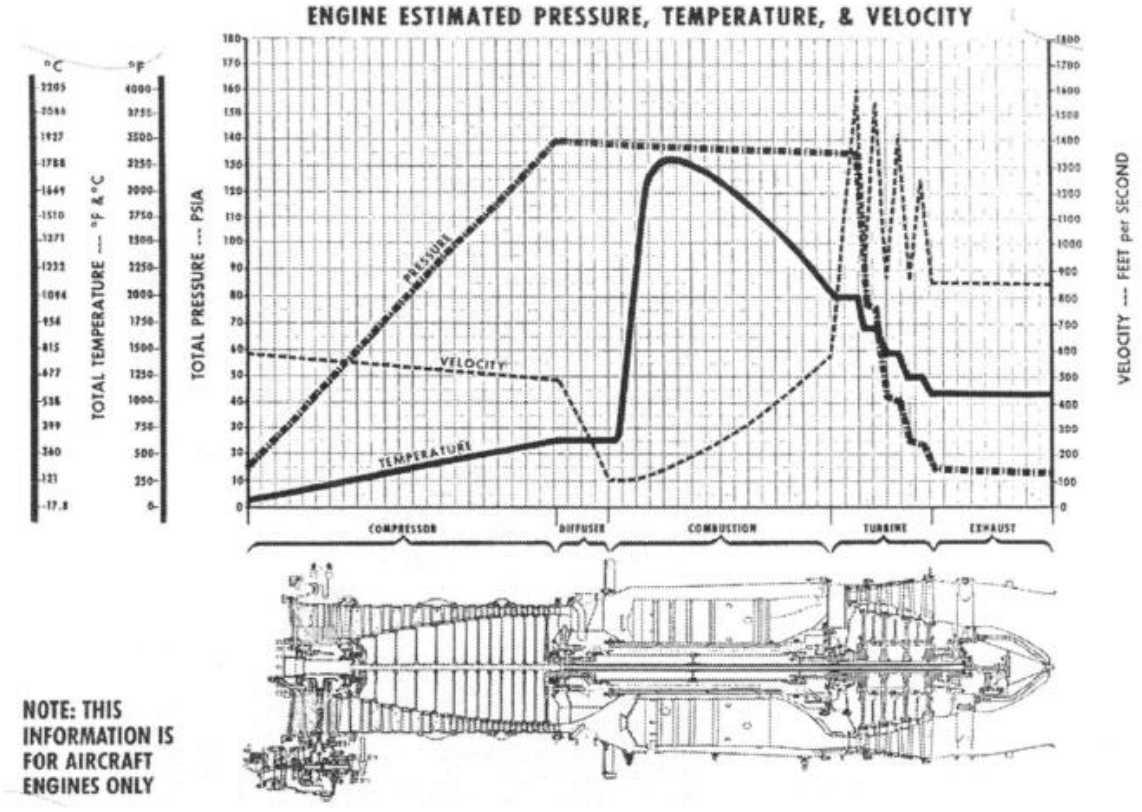


Ilustración 7: Etapas de una turbina Aircraft

En la ilustración mostrada, se pueden observar el cambio de temperatura, velocidad y presión al que está sometido el fluido a lo largo de las etapas de la turbina, centrando la atención especialmente en la fase del compresor, en el cual se usan los álabes de titanio, objeto principal de este proyecto.

5.2 Descripción de equipos y materias primas

Para la ejecución del proceso de aporte por láser, es necesario un conjunto de equipos que, junto al láser forman un centro de LMD. Estos equipos son tanto integrados, como la boquilla situada en el eje Z de la máquina, como equipos externos como el refrigerador. Además, se utilizará también un alimentador de polvo que, junto al láser, permitirá llevar a cabo la ejecución del aporte deseado.

5.2.1 Generador Laser

En el mercado hay una amplia variedad en cuanto a láseres los cuales pueden ser clasificados por sus parámetros o aplicaciones. En cuanto a sus parámetros, los láseres disponibles se podrían clasificar en láseres de gas, láseres de dímero excitado, láseres de diodo, láseres de pulso largo y pulso corto, láseres de CO_2 y láseres de fibra.

Para este proyecto, se utilizará un láser de fibra Rofin FL010, que es el que dispone el taller del Departamento de Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Los parámetros más importantes del láser son el tipo de onda, pudiendo ser esta continua o pulsada, la potencia capaz de suministrar, la distancia focal y el diámetro del spot. Dependiendo del tipo de onda, pueden variar el resto de parámetros del láser. La potencia permite alcanzar un rango de temperaturas para poder fundir el polvo inyectado en el sustrato. El diámetro del spot es el

diámetro que presenta el punto de luz que proyecta el láser sobre el sustrato. Este puede variar convenientemente dependiendo la operación que se desee llevar a cabo en el centro de LMD.

Ilustración 8: Generador Rofin FL010

El láser Rofin FL010 es un láser que produce pulsos muy cortos de forma resonante y los concentra mediante una lente para introducirlo en la fibra óptica. El láser va rebotando por la óptica y saldrá al colimador en todas las direcciones. El colimador lanza el láser en paralelo hacia una serie de lentes que enfocan el láser hacia un único punto [1,5].

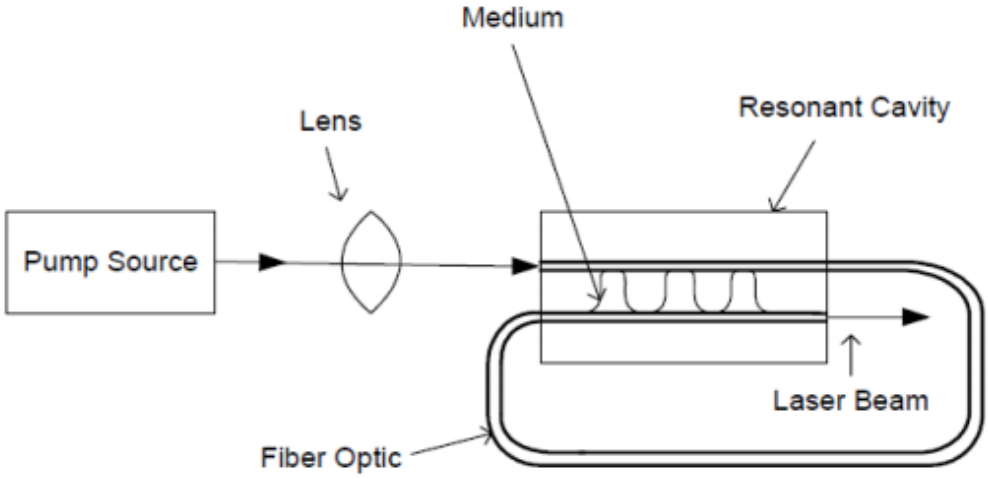


Ilustración 9: Generador láser

La potencia máxima de este láser de fibra es de 1000 W y su longitud de onda es λ=1080±10ηm. Este parámetro hay que tenerlo muy en cuenta, ya que un cambio en la longitud de onda produce

cambios en otros parámetros. También hay que tener en cuenta que la absorción del material depende de la longitud de onda.

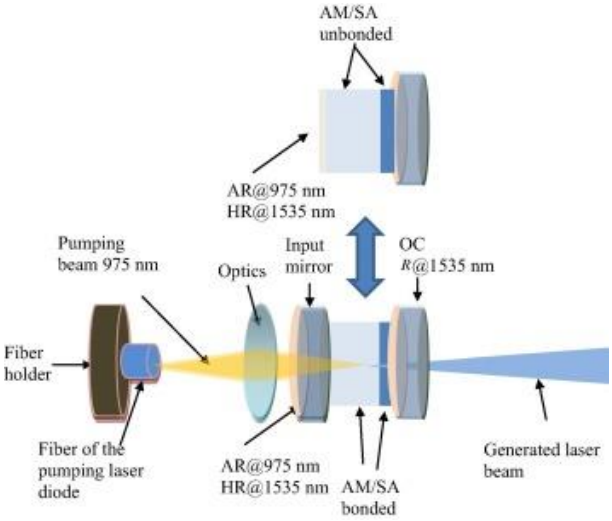


Ilustración 10: Etapas del colimador

Cuando el spot del láser impacta en el sustrato, se transmite de tres maneras diferentes con el sustrato y el ambiente que lo rodea. Por una parte, parte de la energía se ve reflejada y se transmite al aire que rodea el sustrato. Otra parte es transmitida en forma de calor por conducción al sustrato y finalmente, la tercera parte consigue traspasar el material.

5.2.2 Sistema de refrigeración

El generador láser necesita un sistema de refrigeración para compensar las altas temperaturas a las que este puede llegar, por eso, este sistema tiene que estar encendido a lo largo del funcionamiento del láser por seguridad, en caso contrario, el láser no se activará. El equipo de refrigeración del que se dispone en el Taller del Departamento de Mecánica, es un KKT Kraus OLB-5.

Ilustración 11: Refrigerador KKT Kraus OLB-5

Mientras el generador del láser está en funcionamiento, este equipo bombea un líquido constituido por agua y refrigerante R-134a por un circuito, extrayendo el calor del láser y expulsándolo posteriormente mediante un sistema de ventilación al aire del taller.

5.2.3 Mesa de posicionamiento de dos ejes X-Y

El centro de mecanizado adaptado para procesamiento láser, cuenta con una mesa de posicionamiento de dos ejes, para poder situar y posteriormente mover la pieza a reparar o el sustrato en el que aportar con precisión. El eje Z estará situado en la misma boquilla por donde sale el láser, pudiendo esta subir y bajar, aportando un grado de libertad más. Para la mayoría de operaciones, estos tres grados de libertad se utilizarán simultáneamente, aunque para ciertas operaciones puedan utilizarse por separado.

Ilustración 12: Mesa de posicionamiento X-Y

En el caso de este proyecto, además de los tres grados de libertad ya mencionados, se necesitan otros dos que den la opción de añadir movimientos angulares a la pieza, de forma que, instalando un plato giratorio, pueda disponerse de hasta cinco grados de libertad, tres de traslación y dos de rotación.

5.2.4 Centro de procesamiento láser

Tanto los ensayos sobre las características del aporte como los de la estrategia de aporte del álabe de titanio se llevarán a cabo en el mismo centro de procesamiento láser. Esta máquina ha sido adaptada para trabajar con láser, partiendo de un centro de fresado Kondia Aktinos 500.

Ilustración 13: Kondia Aktinos 500

Este centro de procesamiento láser está compuesto de varios equipos como la mesa de posicionamiento de dos ejes mencionada anteriormente, el eje Z donde se sitúa la boquilla y el plato de los dos movimientos angulares si se necesitara utilizar. Por otro lado, como por seguridad el láser no puede funcionar si la puerta del centro está abierta, se dispone de un monitor Samsung fuera de ella para que, mediante una cámara digital se pueda observar el proceso que está sucediendo dentro de la máquina y pararlo en el caso de ver que algo está funcionando mal. Además, consta de un centro de control numérico con el cual se ejecutan los programas necesarios.

5.2.5 Boquilla (Nozzle)

La boquilla de la que se dispone, es una boquilla especialmente diseñada en el mismo taller del Departamento de Mecánica para los procesos de aporte por láser. Esta boquilla, tiene como objetivo dirigir el conjunto de polvo y gas de arrastre hacia el punto en el que incide el haz de láser sobre el sustrato. Además del gas de arrastre, consta de otro circuito mediante el cual se aporta un gas de protección sobre la zona del aporte con el objetivo de inertizar esa zona y no se produzcan reacciones no deseadas en el material. Por otro lado, este gas protege la entrada de impurezas por el orificio central para que no haya partículas que puedan hacer contacto con la lente que hace enfocar al láser.

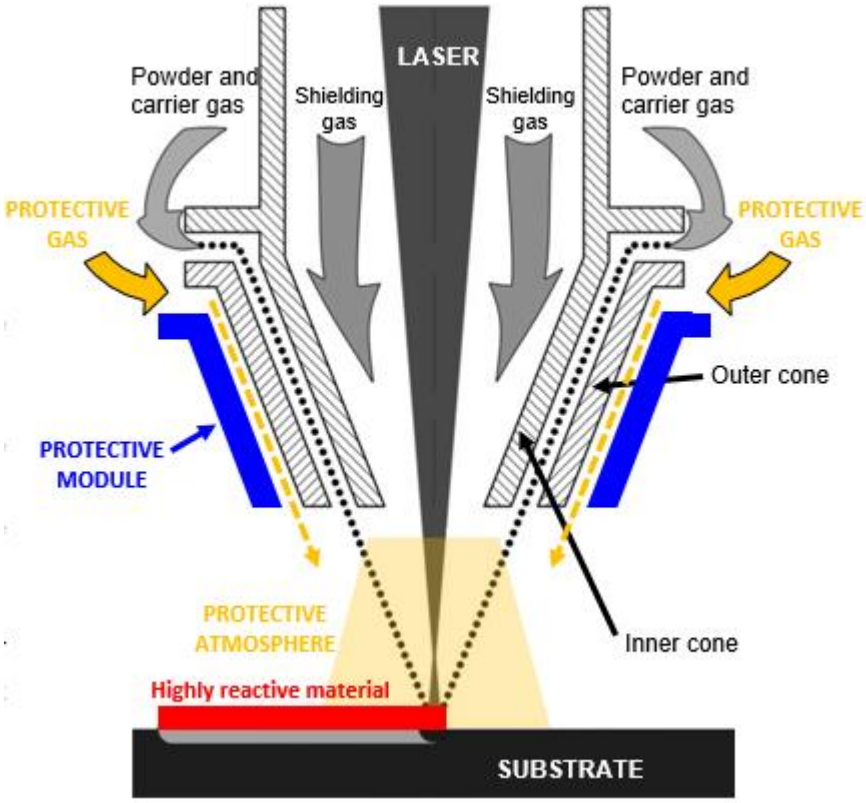


Ilustración 14: Boquilla coaxial del láser

Como se puede observar en la figura anterior, el orificio central se utiliza para dirigir el láser hacia el sustrato y para que salga el gas de protección y proteja tanto la lente como el láser. Alrededor de este orificio, hay una especie de corona, que rodea el orificio anterior, por el cual se suministra el polvo metálico junto al gas de arrastre. Al contrario que en otras boquillas que disponen de varias salidas de polvo que se pueden usar simultáneamente, en esta el sistema de aporte es una corona concéntrica por la cual se expulsa material con polvo de arrastre de manera continua y uniforme desde que se enciende el inyector de polvo hasta que se apaga. También se puede observar una corona extra, concéntrica a la anterior, que proporciona un caudal extra de gas de protección, creando una atmósfera protectora para proteger la zona del aporte y disminuir todo lo posible la oxidación que se pueda producir [4].

Esta boquilla está situada en el eje Z del sistema y mediante el centro de procesamiento se puede acercar o alejar del sustrato para determinar el diámetro del spot o haz láser.

Finalmente, como parámetros más importantes del láser se pueden destacar la distancia focal del polvo, que es la longitud a la que el polvo se concentra en mayor grado, medida desde la boquilla y la distancia focal del láser, que es el punto en el que el spot presenta un área mínima. Esta distancia viene referenciada a otra parte del láser por comodidad.

5.2.6 Gas de arrastre y Gas de protección

En este caso, tanto el gas de arrastre como el gas de protección que se usará a lo largo de los ensayos es el Argón. Estos gases están almacenados en bombonas de gas comprimido, situadas en las proximidades del centro de procesamiento láser. Cuando se comienza el proceso, se abren las llaves para que el gas pueda pasar de la bombona al alimentador de polvo y a la boquilla, y cuando se acabe el proceso es importante que estas llaves se cierren.

Ilustración 15: Bombonas de gas Argón y Helio

El gas de protección es especialmente interesante en este caso, ya que el sustrato de titanio se puede oxidar fácilmente con un porcentaje mínimo de oxígeno. Este gas creará una especie de campana protectora con el fin de evitar que el oxígeno del aire circundante penetre en la pieza que se está aportando.

Al utilizar dos recorridos diferentes para suministrar el gas desde las bombonas hasta el aporte, este proceso proporciona la posibilidad de trabajar con gases diferentes si se requiere.

El Argón adquiere especial interés frente a otros gases protectores como el Helio o el Nitrógeno debido a su precio. Este gas, el Argón puro 2X es el más habitual en este tipo de procesos aditivos por su carácter inerte y por ser más económico que las opciones mencionadas. Tiene una pureza de un 99,998% de Argón [7].

5.2.7 Sustrato

El sustrato del que se dispone para estos ensayos, es de Ti-6Al-4V. Esta superaleación de titanio es frecuentemente utilizada en la industria aeroespacial, por las propiedades mecánicas que ofrece respecto al peso.

Es una aleación alfa-beta con una ratio muy alto Esfuerzo-Peso y una excelente resistencia a la corrosión. Hay que tener en cuenta que las propiedades mecánicas de la aleación son función de los tratamientos térmicos a los que se ha sometido. De todos modos, dichas propiedades varían entre un máximo y un mínimo mostrados en la tabla inferior.

	Density, g/cm^3	Young's Modulus, GPa	Shear Modulus, GPa	Bulk Modulus,GPa	Poisson's Ratio	Yield Strength, MPa (Tensile)	Ultimate Strength, MPa (Tensile)	Hardness, Rockwell C	Uniform Elongation, %
Min	4.429	104	40	96.8	0.31	880	900	36 (Typical)	5
Max	4.512	113	45	153	0.37	920	950	--	18

Ilustración 16: Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V

Este tipo de materiales son adecuados para entornos sometidos a altos esfuerzos tanto mecánicos como térmicos y por eso se utilizan en los compresores de turbinas de avión. Es un elemento ligero en comparación con otras alternativas que se podrían utilizar para la misma función como podría ser el Inconel 718, que se utiliza para los álabes de la turbina por su alta resistencia a altas temperaturas. Este material es más pesado que el titanio, pero el titanio no soportaría de manera adecuada las altas temperaturas que soporta el Inconel 718. Por otro lado, en el compresor las temperaturas alcanzadas son menores y el titanio ofrece una mejor alternativa debido al peso que tiene.

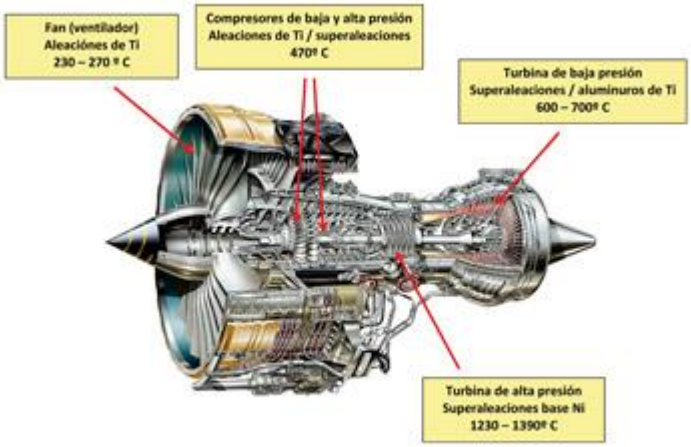


Ilustración 17: Reactor de propulsión del motor de un avión

En la ilustración mostrada se pueden distinguir los diferentes materiales utilizados para las diferentes partes del turborreactor.

Los materiales mencionados son difíciles de mecanizar y moldear utilizando métodos tradicionales por su rápido endurecimiento. Por ello es recomendable usar materiales como el titanio en procesos de aporte por láser donde se pueda manipular el material sin problemas. De esta manera se pueden obtener geometrías complejas con materiales difíciles de manipular.

5.2.8 Polvo

El polvo es la materia prima necesaria en cualquier proceso aditivo. Este polvo se introduce en el alimentador de polvo de la manera adecuada y mediante esta máquina y el gas de arrastre es suministrado a la boquilla.

Primero, se deposita el polvo en la tolva del alimentador y se pone en funcionamiento. La tolva se precalienta hasta una temperatura concreta para eliminar la posible humedad que pueda tener el polvo. A continuación, se establece la corriente del gas de arrastre produciendo una presión en los conductos que llevan el polvo hasta la boquilla. Finalmente, el polvo es expulsado por la boquilla y se funde sobre el sustrato mediante el haz láser.

Uno de los aspectos más interesantes del LMD es la gran variedad de polvos que se pueden utilizar para la fabricación de piezas. Estos polvos pueden ser tanto de metales puros como por ejemplo el aluminio, o de aleaciones como en este caso el Ti-6Al-4V.

Ilustración 18: Ti-6Al-4V en polvo

Estos materiales deben ser cuidadosamente manipulados, ya que son muy perjudiciales para la salud. En concreto el material con el que se van a hacer los ensayos, el titanio, es un compuesto cancerígeno que, además, al reaccionar con el oxígeno tan fácilmente, puede llegar a incendiarse tras una manipulación brusca o descuidada. Por eso, siempre que haya que manipular el polvo de titanio, se han de usar guantes y la máscara de protección para evitar inhalarlo [6].

5.2.9 Alimentador de polvo

Este elemento se utilizará para suministrar el caudal de polvo deseado para los ensayos. Se trata de una "Sultzen Metco Twin 10-C Powder Feeder" que consta de dos tolvas para poder realizar operaciones de alimentación de dos caudales de polvo de diferente material en un mismo proceso. Cada una de las tolvas contiene un disco, de diferente ranura para caudales de polvo diferentes. Las dos tienen un panel de control para regular las condiciones de operaciones y un caudalímetro. También tienen, rodeando cada una de ellas, dos camisas calefactoras para calentar el polvo [8].

Antes de comenzar el proceso de aporte, se debe introducir el polvo del material deseado dentro de la tolva con cuidado, tratando de no desbordar material fuera de ella. Una vez introducido el polvo, se enciende el panel de control y se procede a precalentarla con la camisa calefactora. Esto se hace para eliminar la posible humedad que haya adquirido el polvo. Una vez se llegue a la temperatura de consigna, se seleccionará el porcentaje de giro del disco, calibrándolo con la cantidad necesaria de polvo en g/min que se quiera introducir. Finalmente, cuando se haya calibrado el caudal deseado, se seleccionará en el panel de control la opción gas más polvo para introducir ambas cosas en el proceso de aporte.

Ilustración 19: Sultzer Metco Twin 10-C Powder Feeder

6. Metodología

El presente proyecto, está enfocado en la investigación de diferentes estrategias de aporte para la fabricación de un álabe de titanio y para ello, habrá que hacer una investigación previa sobre las características de los diferentes cordones obtenidos con diferentes parámetros de aporte, para definir el cordón óptimo y utilizarlo en los posteriores ensayos sobre el aporte del álabe.

Tanto para el sustrato como para el polvo metálico se utilizará una aleación de titanio Ti-6Al-4V, un componente que destaca en el ámbito aeroespacial por sus características mecánicas y peso. El sustrato que se utilizará para realizar el aporte tendrá 10 mm de espesor y 130 mm de longitud.

Todos los ensayos y mediciones necesarias para definir el proyecto, se realizarán en el Taller del Departamento de Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Ilustración 20: Taller de Mecánica

6.1 Preparación previa

Para realizar el aporte de manera adecuada sobre el sustrato, hay que garantizar que en el lado del sustrato en el que se va a realizar el aporte se cumplan ciertas condiciones superficiales. Para ello, se requiere preparar el sustrato antes de realizar cualquier aporte.

Preparar el sustrato requiere cortar la longitud deseada de material de la barra de material bruto almacenada en el taller. Por tanto, habiendo seleccionado la barra, se procede a cortarla en la sierra metalográfica. Al ser esta barra de una longitud grande, no cabe dentro de la sierra teniendo que utilizar una pestaña lateral para poder introducir esta en la máquina. Una vez introducida, habrá que agarrarla de manera adecuada con las mordazas disponibles dentro de la máquina y un apoyo supletorio fuera de esta, para que cuando se corte la longitud deseada no realice un efecto palanca y choque contra el disco metalográfico, produciendo una fractura en él.

Ilustración 21: Sierra metalográfica

Cabe destacar, que para el corte del sustrato se utilizará un disco de corte especial para titanio, cuyo uso únicamente se limita al corte de este material. Posteriormente, los cortes que se harán para la obtención de probetas también se realizarán con este mismo disco que, una vez se haya utilizado, habrá que cambiarlo por el que estaba puesto en la máquina anteriormente, y guardarlo en el armario del material metalográfico del departamento de láser dentro del taller.

Ilustración 22: Disco de corte para titanio

Una vez obtenido el sustrato del material bruto, se procederá a dotarlo de características superficiales adecuadas para el aporte, y esto se llevará a cabo en la rectificadora. En esta máquina, lo que se consigue es un acabado superficial óptimo y una planicidad de las caras del sustrato para realizar el aporte. Esto se consigue mediante una muela rectificadora que gira a una velocidad angular constante y avanza con una velocidad lineal en sentido perpendicular al movimiento de vaivén de la plataforma donde se sitúa el sustrato.

Ilustración 23: Rectificadora

Para el proceso de rectificado, habrá que colocar el sustrato en una mordaza utilizando unas calas patrón para fijarla a una altura determinada, y para que estas no permitan, dentro de lo posible, que se forme una flexión en la pieza debido a muela. Una vez se haya situado el sustrato en la mordaza, esta se coloca en la mesa magnética de la rectificadora, proporcionando con una palanca un giro de 180° para que la mordaza quede totalmente fijada a la mesa. La máquina no se pondrá en funcionamiento a no ser que la ventana protectora esté cerrada, como medida de seguridad. Es muy importante mantener la precaución ya que a lo largo del proceso de rectificado la muela arranca virutas del sustrato y si no fuera por la ventana de seguridad, estas virutas podrían impactar sobre el operario. Por otro lado, desde el lado de seguridad de la máquina y el sustrato, habrá que elevar la muela antes de empezar el proceso por precaución, ya que de lo contrario podría estamparse contra el sustrato y llegar incluso a romperse.

Una vez tomadas las precauciones necesarias, se procederá al rectificado de la pieza, observando cada cierto tiempo el estado de la superficie que, al ser titanio, es más susceptible de sufrir ligeras quemaduras a lo largo del proceso. Para que esto no suceda, es importante ir bajando la muela muy poco a poco y asegurarse de que haya un flujo constante de taladrina.

Finalmente, una vez rectificada la cara en la que se va a hacer el aporte, habrá que limpiar y recoger todas las herramientas utilizadas para el proceso y dejar la zona de trabajo en buenas condiciones para que la siguiente persona en utilizarla no tenga ningún inconveniente.

6.2 Realización de aportes

El siguiente paso del proyecto es el análisis de las características del cordón variando los parámetros de aporte. Para ello, se ha realizado previamente la programación de los comandos que ha de seguir el centro de procesado láser mediante control numérico. Este programa se ha realizado directamente en la máquina, de manera que el láser realice un recorrido en el que aporta en una línea recta y regresa al punto de inicio sin aportar. Una vez realizado el aporte, las coordenadas del láser se sitúan en el inicio de la siguiente línea a aportar y así sucesivamente, hasta aportar todos los cordones.

Para realizar los aportes anteriormente mencionados, primero hay que situar el sustrato en la mesa de posicionamiento y establecer las coordenadas X-Y-Z para luego ejecutar los programas del centro de procesamiento láser. Para situar la pieza adecuadamente, se utiliza un spot de referencia del láser, que estando este apagado, ofrece la posibilidad de ver dónde se realizaría el aporte si este estuviera encendido. Con ese punto como referencia, se establecen los “ceros” en la máquina en los ejes X e Y. Para establecer el “cero” en la coordenada Z, se utiliza una cala patrón de 30 mm, y se ajusta la altura de la boquilla a esa altura, marcando 15 mm en el

programa. De esta manera, el "cero" del eje Z se situará a 15 mm del sustrato, que será la distancia focal a la que se realizará el aporte.

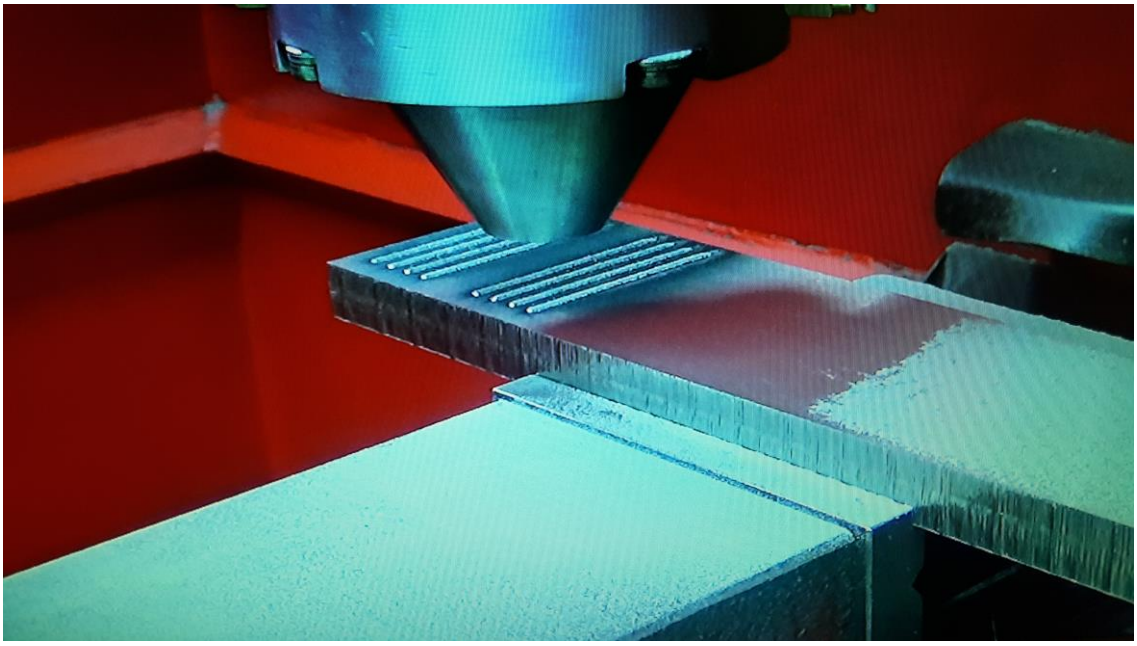


Ilustración 24: Proceso de aporte

Es muy importante situar el sustrato de manera que no se mueva durante el proceso, con un sistema de fijación como puede ser una mordaza para asegurar que las coordenadas introducidas en el programa se ajusten a los "ceros" previamente establecidos.

En el aporte de titanio es necesario contar con una atmósfera capaz de evitar la oxidación del material durante el proceso. Para ello se utiliza el Argón, para inertizar la zona del aporte del cordón y crear una atmósfera protectora local y no total, ya que la segunda opción supondría un gran coste teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos este gas no se puede reutilizar posteriormente.

Esta solución consiste en incorporar a la boquilla de aporte por láser un módulo capaz de crear dicha atmosfera alrededor del material aportado durante la ejecución del proceso. El gas de protección envuelve la zona del aporte impidiendo al oxígeno reaccionar con el titanio.

6.3 Caracterización del material

Para determinar los parámetros de aporte del material, se realizarán una serie de experimentos con el objetivo de conocer cuáles son las características óptimas para un aporte de cordones simples. Por lo tanto, se realizará la misma línea de aporte varias veces, variando parámetros como potencia, velocidad de avance y caudal de polvo.

Con el objetivo de hacer una tabla que recoja las características de los cordones, se realizan los aportes en el sustrato de la siguiente manera:

1- Se configura el láser con una potencia de 300 W y el alimentador de polvo de manera que proporcione un caudal de 2 g/min. Una vez establecidos dichos parámetros, se procede a aportar el primer cordón con una alimentación de 200 mm/min.
2- Para realizar el segundo aporte, se mantienen constantes la potencia y el caudal, variando la alimentación a 500 mm/min. Así se hará sucesivamente variando la alimentación a 800 mm/min en el tercer aporte y 1200 mm/min en el cuarto. Esta es la manera más sencilla de realizar estos aportes, ya que variar la alimentación es más fácil que la potencia del láser, que requiere más tiempo, y que el caudal de polvo.

3- Una vez obtenido este bloque de cuatro aportes, se cambian las coordenadas del láser para que realice los siguientes cuatro aportes en otra zona del sustrato. De esta manera, se podrán analizar posteriormente en probetas que contengan los cuatro cordones obtenidos en los mismos parámetros de potencia y caudal.
4- Establecidas las nuevas coordenadas de aporte, se vuelven a realizar los pasos anteriores, cambiando la potencia del láser a 500 W obteniendo otros cuatro cordones. Una vez obtenidos estos cordones, se eleva la potencia a 700 W y se realizan otros 4 aportes.
5- Se repiten otra vez los pasos anteriores, esta vez situando la potencia del láser en 500 W y elevándola después a 700 W respectivamente. También se eleva el caudal a 3 g/min. Se ha decidido utilizar estas potencias basándose en los ensayos anteriores. Al no haber fundido bien con 2 g/min a 300 W, en este caso la fusión sería peor y a su vez, si con 700 w y 3 g/min se ve que se funde prácticamente todo el polvo, no tiene sentido realizar el ensayo a 900 W. La alimentación varía de la misma manera que en los ensayos anteriores. De esta manera, se obtienen otros 8 cordones.
6- Finalmente, se obtienen los últimos 12 cordones siguiendo los pasos anteriores, elevando la potencia hasta 900 W y aumentando esta vez el caudal a 4 g/min. En este ensayo sí habrá que elevar la potencia debido al aumento del caudal de polvo.

Una vez obtenidos todos los aportes en el sustrato, se procederá a analizar la microestructura de los mismos, con el objetivo de determinar cuáles son los cordones con mejores características de aporte.

Este análisis requiere varios pasos previos, como son el corte de las probetas, encapsularlas en la encapsuladora, pulirlas con diferentes lijas y paños, atacar la probeta pulida químicamente con el reactivo y finalmente, analizar la microestructura del aporte en el microscopio. A continuación, se explicarán detalladamente los procesos mencionados anteriormente, en el orden de su ejecución.

6.4 Corte del sustrato con los aportes

Este paso es similar al del corte del sustrato, ya que se realizará en la misma máquina y con el mismo disco de corte, teniendo en cuenta que tanto el sustrato como el aporte son de Ti-6Al-4V. En este paso, no se utilizará la pestaña lateral que se utilizaba en el sustrato, simplemente se fijará el sustrato con los aportes en las mordazas de la sierra metalográfica y se protegerá el lado de los aportes con unas gomas para que no se dañen durante el apriete. Una vez fijado el sustrato, se cortará por varias zonas, creando pequeñas piezas de cuatro cordones. Estos cortes se realizarán aproximadamente a un cuarto de distancia de la longitud del cordón, para analizar su microestructura en un punto donde el aporte es uniforme y estable. Por otro lado, la pieza resultante del corte se va a encapsular posteriormente y debe tener un tamaño adecuado para introducirlo en la encapsuladora.

6.5 Encapsular las piezas

Este proceso se puede realizar a medida que se hacen los cortes, ya que es un proceso que requiere de tiempo para su ejecución.

Cuando ya se tiene la pieza que contiene los cuatro cordones cortada, se sitúa en el pistón de la encapsuladora, con la cara que posteriormente se quiere pulir en contacto con el pistón. Una vez situada la pieza en el pistón, se acciona la palanca para que este baje, y en el movimiento de descenso se añade una cantidad de 40 ml de resina para crear la probeta. Después con la mano se debe colocar bien la resina dentro del cilindro de la encapsuladora, apretando un poco y formando una superficie uniforme. A continuación, se cierra el cilindro, se enciende la encapsuladora y se acciona la palanca para subir el pistón.

Ilustración 25: Encapsuladora

Durante el proceso, la encapsuladora sube de temperatura hasta una temperatura consigna, que mantiene durante un tiempo para derretir esa resina en polvo y formar una probeta cilíndrica. Este proceso dura aproximadamente 20 minutos por probeta, por lo tanto, requiere esperar cierto tiempo, que se puede utilizar para seguir cortando piezas de sustrato para aprovecharlo.

Como resultado, se obtendrán las denominadas probetas y se numerarán por el lado de la resina, para saber qué aportes contiene cada una de ellas.

6.6 Lijar y pulir las probetas

Una vez encapsuladas todas las probetas, hay que lijar y pulir la superficie que se quiere analizar posteriormente en el microscopio. Se utilizará una pulidora metalográfica manual tanto para el lijado como para el pulido de las probetas. En esta pulidora, se sitúan primero las lijas metálicas de diamante, de un tamaño de grano menor a uno mayor progresivamente, empezando por la de 80 µm. Estas lijas son reutilizables, simplemente hay que lavarlas con agua a presión después de su uso y dejarlas secar.

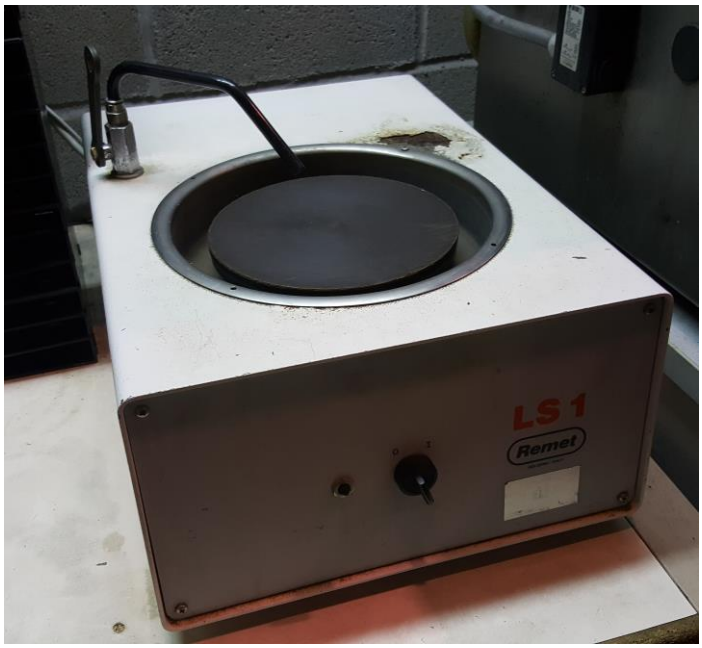


Ilustración 26: Pulidora

Para lijar la probeta, primero se pone la lija imantada sobre la pulidora y con un poco de agua, se pone a girar. Se agarra la probeta con las manos, de manera que la cara a pulir haga contacto con la lija, y se hace una fuerza uniforme a lo largo de la superficie para que no se produzcan diferentes planos al lijarla. Cuando la superficie quede uniforme y sin rayas considerables, se pasa a la siguiente lija, la de 220 µm. Al comenzar con la siguiente lija, es importante poner la probeta girada 90° y lijar en esa dirección. Esto se hará cada vez que se cambie de lija. Así se ira lijando cada probeta pasando por las lijas de 600 µm y 1200 µm finalmente.

Ilustración 27:Lijas de diamante reutilizables

Como se quiere obtener un acabado superficial tipo espejo, después de lijar las probetas, habrá que pulirlas, y para ello se utilizarán los paños reutilizables de 9 µm, 3 µm y 1 µm en ese orden. A estos paños hay que añadirles aerosoles de diamante para que produzcan el efecto deseado sobre la probeta.

En los paños es muy importante el uso de guantes y la limpieza de los paños ya que es muy fácil que estos se contaminen de otras partículas, ya sea de otro material pulido previamente o de el mismo que se está puliendo, y produzca arañazos en la superficie de la probeta. Por lo tanto, habrá que limpiar los paños intensamente antes y después de su uso con agua.

Ilustración 28: Paños de pulido y aerosoles de diamante

Como paso final de pulido, como paño de 1 µm se utilizará un paño especial, únicamente utilizado para pulir probetas de titanio, para evitar posibles contaminaciones de otros materiales dada su extrema delicadez.

Cuando se consiga un pulido tipo espejo, se procederá a atacar químicamente la pieza. Para este proceso es totalmente necesario el uso de guantes e incluso gafas de protección, ya que el líquido utilizado para el ataque, posee un componente que podría producir quemaduras en la piel. Este ataque, se realiza aplicando una fina capa de líquido sobre la superficie de la probeta, acariciándola sucesivamente con un bastoncillo. Una vez atacada la probeta, se lava con agua al igual que el bastoncillo antes de echarlo a la basura. De esta manera, el líquido reacciona con el agua y se neutraliza, reduciendo drásticamente el peligro que supone.

6.7 Microscopía

Como último paso previo al análisis de la superficie, hay que obtener las fotos que se utilizarán como dato de donde se obtendrán los parámetros y características que hacen falta para determinar cuál de los cordones es mejor. Para ello, se utilizará un microscopio Leica DCM 3D, del que dispone la Sala de Metrología del Departamento de Mecánica. Este microscopio, proporciona unas fotos con una gran resolución en las que se podrá analizar el cordón.

Ilustración 29: Microscopio Leica DCM 3D

El microscopio es un elemento delicado, tanto la máquina como las lentes, por tanto, es preciso que se utilice con cuidado y sabiendo cómo utilizarlo, ya que un despiste puede suponer un alto coste económico a la universidad.

Para poner en marcha el sistema del microscopio, junto al ordenador en el que se ejecutan los programas de mapeo y visualización, es necesario utilizar los elementos de almacenamiento en los que se guardan las licencias para utilizar dichos programas. Una vez iniciados los programas, habrá que situar la probeta en la mesa de posicionamiento neumática de la que dispone el microscopio, y con una lente de enfoque x5, ir bajando poco a poco hasta ver la superficie de una manera difusa en la pantalla del ordenador.

Cuando ya se haya localizado la superficie, se realizará un enfoque automático para ver la superficie con mayor resolución y se alineará la probeta. Una vez alineada, mediante un mando de control se puede mover la lente a lo largo de la superficie, e identificar los diferentes cordones. Variando con los aumentos, de x5, x10 y x25, se obtendrán las fotos de las superficies de las probetas y se generarán archivos que mantengan la alta resolución de las imágenes para su posterior análisis.

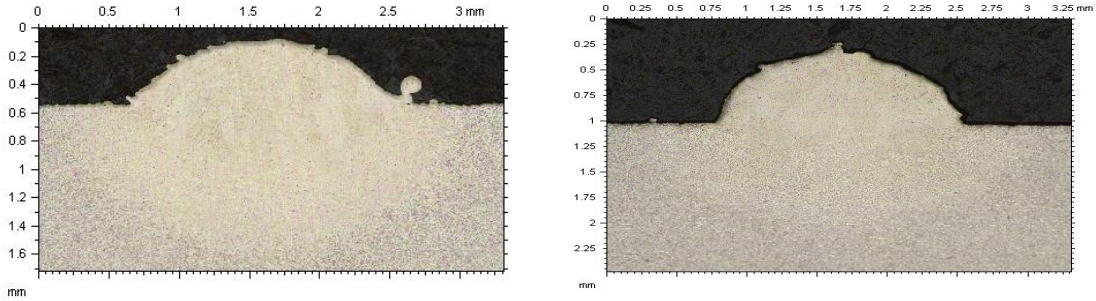


Ilustración 30: Microscopía de diferentes cordones

6.8 Análisis de la microscopía

Para finalizar con el ensayo, se analizarán las fotos obtenidas anteriormente con un programa como el AutoCAD, en el que se podrán medir la altura del cordón, la anchura del cordón, la profundidad de dilución y el ángulo de mojado.

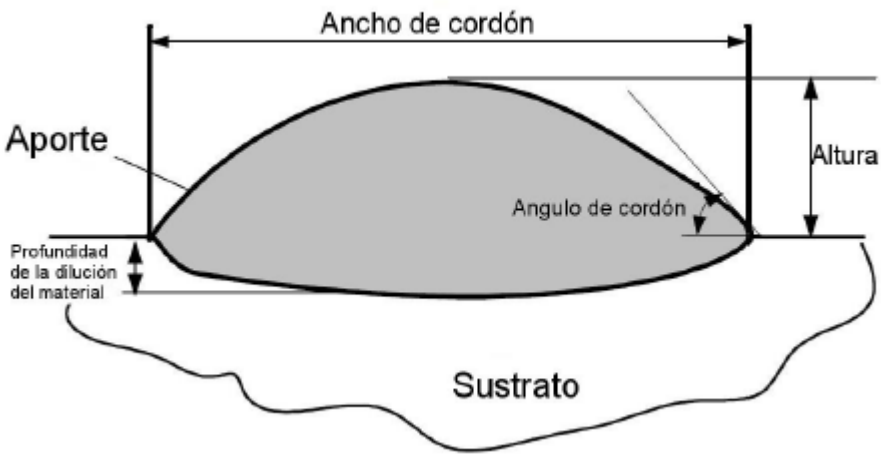


Ilustración 31: Características del aporte

Finalmente, se obtendrá la siguiente tabla de datos, correspondiente a las características de cada uno de los cordones aportados, analizando sus características y determinando cuál de ellos cumple mejor los requisitos de aporte.

REF	POWER	FEED RATE	POWDER	de	dp	ee	W	H	Ratio	Dilution	wetting	HAZ
	W	mm/min	g/min	J/mm2	g/mm2	J/g	mm	mm	[]	mm	º	mm
Ti_AA_11	300,00	200,00	2,00	75,00	0,50	150,00	1,19	0,35	**3,40**		61,00	0,57
Ti_AA_12	300,00	500,00	2,00	30,00	0,20	150,00	0,98	0,19	**5,16**		40,00	0,44
Ti_AA_13	300,00	800,00	2,00	18,75	0,13	150,00	0,86	0,14	**6,14**		40,00	0,37
Ti_AA_14	300,00	1200,00	2,00	12,50	0,08	150,00	0,80	0,07	**11,43**		16,00	0,26
Ti_AA_21	500,00	200,00	2,00	125,00	0,50	250,00	1,77	0,70	**2,53**	0,19	68,00	0,75
Ti_AA_22	500,00	500,00	2,00	50,00	0,20	250,00	1,53	0,25	**6,12**	0,23	23,00	0,62
Ti_AA_23	500,00	800,00	2,00	31,25	0,13	250,00	1,40	0,18	**7,78**	0,19	24,00	0,51
Ti_AA_24	500,00	1200,00	2,00	20,83	0,08	250,00	1,26	0,11	**11,45**	0,18	12,00	0,43
Ti_AA_31	700,00	200,00	2,00	175,00	0,50	350,00	2,41	0,76	**3,17**		65,00	1,16
Ti_AA_32	700,00	500,00	2,00	70,00	0,20	350,00	1,90	0,32	**5,94**		28,00	1,01
Ti_AA_33	700,00	800,00	2,00	43,75	0,13	350,00	1,76	0,18	**9,78**		12,00	0,83
Ti_AA_34	700,00	1200,00	2,00	29,17	0,08	350,00	1,52	0,12	**12,67**		11,00	0,66
Ti_AA_41	500,00	200,00	3,00	125,00	0,75	166,67	1,73	0,96	**1,80**			1,05
Ti_AA_42	500,00	500,00	3,00	50,00	0,30	166,67	1,52	0,43	**3,53**		41,00	0,84
Ti_AA_43	500,00	800,00	3,00	31,25	0,19	166,67	1,39	0,24	**5,79**		23,00	0,67
Ti_AA_44	500,00	1200,00	3,00	20,83	0,13	166,67	1,27	0,16	**7,94**		15,00	0,53

Ti_AA_51	700,00	200,00	3,00	175,00	0,75	233,33	2,32	1,04	**2,23**		90,00	1,12
Ti_AA_52	700,00	500,00	3,00	70,00	0,30	233,33	1,97	0,46	**4,28**		40,00	0,97
Ti_AA_53	700,00	800,00	3,00	43,75	0,19	233,33	1,75	0,33	**5,30**		28,00	0,78
Ti_AA_54	700,00	1200,00	3,00	29,17	0,13	233,33	1,46	0,15	**9,73**		13,00	0,63
Ti_AA_61	500,00	200,00	4,00	125,00	1,00	125,00	1,64	1,17	**1,40**			0,74
Ti_AA_62	500,00	500,00	4,00	50,00	0,40	125,00	1,48	0,58	**2,55**		73,00	0,54
Ti_AA_63	500,00	800,00	4,00	31,25	0,25	125,00	1,37	0,37	**3,70**		46,00	0,47
Ti_AA_64	500,00	1200,00	4,00	20,83	0,17	125,00	1,23	0,20	**6,15**		22,00	0,44
Ti_AA_71	700,00	200,00	4,00	175,00	1,00	175,00	2,21	1,34	**1,65**			1,02
Ti_AA_72	700,00	500,00	4,00	70,00	0,40	175,00	1,97	0,57	**3,46**		53,00	0,88
Ti_AA_73	700,00	800,00	4,00	43,75	0,25	175,00	1,85	0,37	**5,00**		28,00	0,71
Ti_AA_74	700,00	1200,00	4,00	29,17	0,17	175,00	1,51	0,30	**5,03**		27,00	0,58
Ti_AA_81	900,00	200,00	4,00	225,00	1,00	225,00	2,83	1,33	**2,13**			1,40
Ti_AA_82	900,00	500,00	4,00	90,00	0,40	225,00	2,40	0,61	**3,93**		57,00	1,22
Ti_AA_83	900,00	800,00	4,00	56,25	0,25	225,00	2,06	0,38	**5,42**		26,00	0,96
Ti_AA_84	900,00	1200,00	4,00	37,50	0,17	225,00	1,75	0,27	**6,48**		25,00	0,83

Tabla 1: Características de los aportes

En la tabla se comparan los resultados de altura y anchura de cordón, ya que no interesa que el cordón sea alto y delgado, o prácticamente plano. Se observa la distancia de la superficie a la que ha penetrado el aporte, es decir, la dilución y finalmente, el ángulo de mojado, que es el ángulo que forma la superficie del sustrato con la pendiente del aporte en su extremo. En la tabla se muestran en color naranja los cordones que cumplen con las condiciones previamente establecidas, y en color rojo los cordones que no sirven para la posterior estrategia de aporte. Los criterios que se han tenido en cuenta para la selección de estos cordones, han sido que el cordón creciera un mínimo de un tercio respecto de la anchura, teniendo en consideración los cordones que más crecen, que el ángulo de mojado fuera inferior a 45 ° para las posteriores capas que se apliquen en el proceso, y que el diámetro del haz sea el menor posible para que la temperatura se concrete en un área menor. Basándose en esos criterios, se han seleccionado como opciones posibles el Ti_AA_53 y el Ti_AA_73. Estos dos cordones muestran características muy parecidas, siendo un poco mejor el segundo de ellos. Aun así, se seleccionará el primero por requerir una cantidad de polvo menor.

Ilustración 32: Características óptimas del cordón

Una vez obtenidos los aportes con una calidad aceptable, se pueden solapar en forma de capas uniformes y sin defectos. Para ello, se elaborarán una serie de experimentos, para evaluar el porcentaje necesario de solape que garantice la uniformidad de las capas.

REF	Overlap %	W	H	Ratio	Dilution
		mm	mm	[]	mm
Ti_AA_53_20	20%	7,31	0,41	**3,57**	
Ti_AA_53_30	30%	6,60	0,41	**3,22**	0,73
Ti_AA_53_40	40%	5,95	0,41	**2,90**	0,75
Ti_AA_73_20	20%	7,24	0,54	**2,68**	
Ti_AA_73_30	30%	6,60	0,53	**2,49**	0,71
Ti_AA_73_40	40%	5,94	0,54	**2,20**	0,72

Tras los ensayos para determinar el porcentaje de solape, se analizarán los cordones solapados y se determinará cuál de las opciones es la más adecuada. En este caso, se optará por el ensayo Ti_AA_53_40.

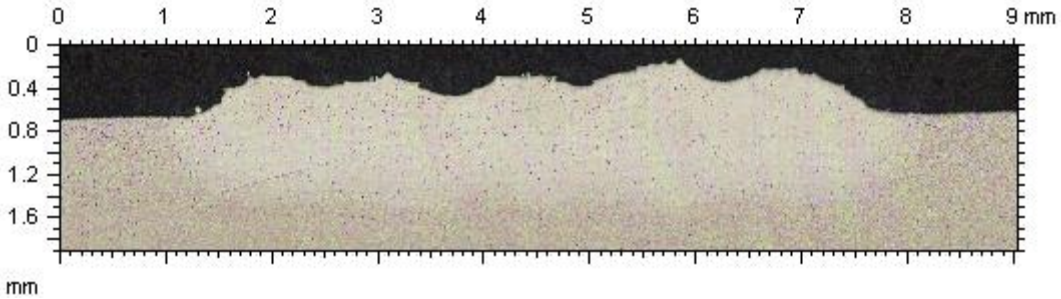


Ilustración 33: Microscopía del solape Ti_AA_53_30

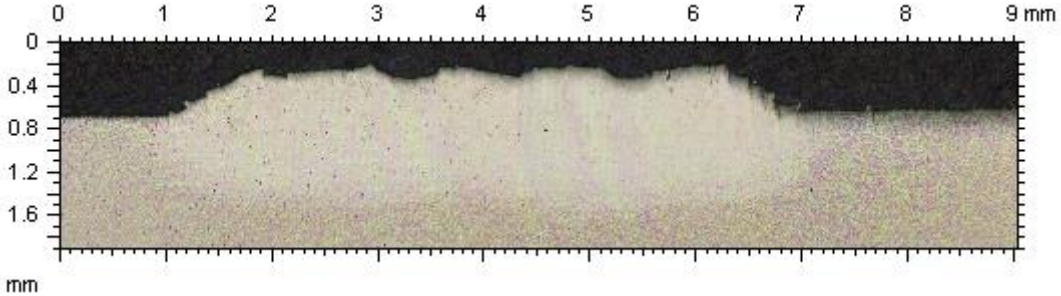


Ilustración 34: Microscopía del solape Ti_AA_53_40

En estos ensayos se ha definido una horquilla de parámetros válidos, entre el solape del 30% y el solape del 40%. De esta manera, aunque se presente mejor solape en el segundo caso, se podría trabajar con porcentajes intermedios si el proceso lo requiriera, obteniendo unos valores válidos de aporte.

Con el uso de los parámetros definidos para una capa, se procederá a realizar un álabe, para demostrar que el crecimiento por capa es el correcto.

6.9 Aporte del álabe de Ti-6Al-4V

Una vez realizado el análisis de las características de los cordones y habiendo seleccionado los parámetros adecuados, se procederá a fabricar un álabe con una estrategia monocordón para demostrar la viabilidad del aporte de titanio en geometrías complejas.

Estos serán los parámetros que se van a utilizar:

Parámetros de proceso		*Caracterización geométrica del cordón*	
Potencia programada, *P* [W]	700	Ancho de cordón, *w* [mm]	1.75
Avance, *f* [mm/min]	800	Alto de cordón, *h* [mm]	0.33
Caudal de polvo, *q* [g/min]	3	Ratio, *r* [-]	5.30
		Ángulo de mojado, *α* [º]	28
		Zona afectada térmicamente, *HAZ [mm]*	0.78

Tabla 2: Parámetros y características del cordón

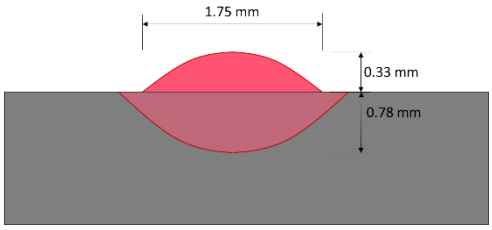


Ilustración 35: Características del cordón seleccionado

Con la estrategia monocordón, se pretende realizar un aporte por láser de un cordón que marque la geometría del álabe y realizar esta operación sucesivamente, aportando sobre el cordón anterior y produciendo así una geometría compleja en tres dimensiones. La geometría del álabe consta de dos partes, un álabe hueco de una geometría dada que formará el exterior del álabe y una geometría interior en forma de "zigzag" correspondiente al sistema de refrigeración del álabe.

Preparación del sustrato

El proceso de preparación del sustrato será exactamente igual al del ensayo anterior. Habrá que cortar un trozo de 130 mm de longitud de la barra de material bruto en la sierra metalográfica y rectificar la cara en la que se realizará el aporte del álabe en la rectificadora. Al ser titanio, se empleará el mismo método y herramientas de corte.

Programación

Habrá que realizar previamente, un programa para el centro de aporte por láser, que reproduzca la geometría del álabe en el sustrato. Este programa se hará en el mismo centro de procesamiento láser y se simulará con el láser apagado, para asegurarse de que todos los comandos sean correctos y los parámetros estén bien definidos.

Calibración del sustrato

Como en el ensayo anterior, habrá que hacer "ceros" en el sustrato y fijarlo en la mesa de coordenadas de la máquina, para que el programa reproduzca la geometría exactamente en las coordenadas deseadas.

Aporte por capas

Después de preparar el sustrato y cargar los programas en el centro de procesamiento láser, se encenderán el láser y el alimentador de polvo, y se abrirán las llaves del gas de arrastre y el gas de protección, dando pie al primer aporte.

Primer ensayo

Para el primer álabe, se realizará un estudio previo para determinar los parámetros del ensayo y se seguirá una estrategia en la que se aportarán sucesivamente capas idénticas entre sí, adaptando la distancia de la boquilla al sustrato en función de la altura crecida.

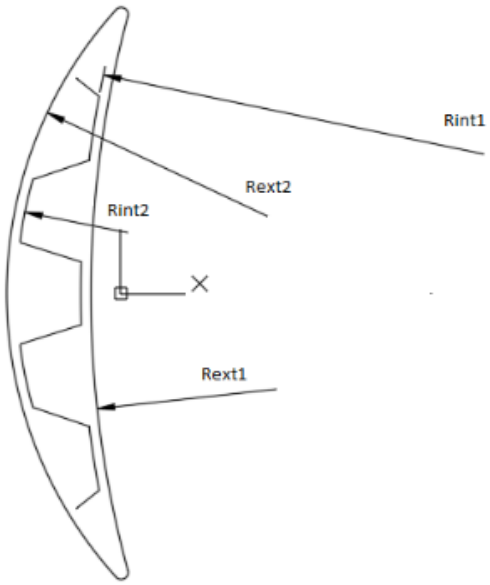


Ilustración 36: Diseño del primer ensayo

<u>Parámetros del ensayo</u>

R_{int1} = 153.77 mm

R_{int2} = 60 mm

R_{ext1} = 152.72 mm

R_{ext2} = 61.05 mm

Distancia entre cordones solapados = 1.05 mm

En este ensayo, se realizará el aporte por capas con un mismo punto como inicio y final del proceso de aporte. Se para el proceso a las pocas capas de aporte, debido a las notables imperfecciones que sufre el proceso. Por tanto, habrá que analizar los defectos producidos y proponer una solución para que no sucedan de nuevo.

Ilustración 37: Pieza ensayo 1

A continuación, se analizarán los defectos localizados:

1- Se observa oxidación debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso. Esta oxidación es notable en las zonas de solape debido a que cuando se realiza el aporte del interior del álabe, el cordón de la periferia ya aportado se encuentra a una elevada temperatura y eso hace que se produzca una mayor oxidación en esas zonas.
2- La pieza crece de manera desigual dependiendo de la zona. Esto se debe a que el solape entre cordones es excesivo y por tanto en la zona bi-cordón la altura es mayor que la deseada.
3- En el punto de inicio y final se genera una bola de aporte. Al ser el proceso cerrado, se aporta de inicio a final siendo este un punto crítico. En este punto se produce una aceleración inicial y una deceleración final, siendo la velocidad mucho menor que en el resto de puntos de la geometría. Esas variaciones provocan esta acumulación de materia.

Ilustración 38: Crecimiento desigual

Ilustración 39: Defecto de inicio-final

Ilustración 40: Oxidación

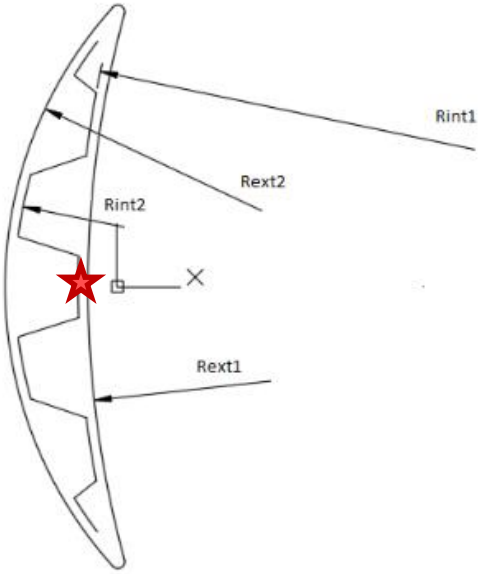
La oxidación sucede debido a la mala evacuación de calor, y como esta evacuación empeora a medida que se depositan las capas, se alcanzan mayores temperaturas y cada vez se oxida más. Para solucionarlo, se tratará de regular la potencia en función de la temperatura que alcanza la pieza, dejando enfriar la pieza entre capa y capa y se intentará crear una atmósfera de Argón más protectora.

Para solucionar el defecto de inicio-final, se ajustará el programa de control numérico para que el punto de inicio-final sea otro que no dé tantos problemas. Se introducirá el comando G501 para que la velocidad no aminore al llegar a curvas y vértices. También se cambiará de sentido de aporte en capas sucesivas.

Finalmente, en cuanto al crecimiento en las zonas bi-cordón, se propondrá disminuir el solape en esas zonas y aumentar la velocidad de aporte de la estructura interna, para que no se produzca ese crecimiento.

Segundo ensayo

Para este segundo ensayo se tratarán de corregir, en la medida de lo posible, todos los defectos localizados en el primer ensayo. Para ello, se realizará de nuevo un estudio que determine los parámetros más adecuados del láser y también modificar los del diseño del álabe, siendo los elegidos los siguientes parámetros:



Parámetros del ensayo

R_{int1} = 154.14 mm

R_{int2} = 59.6 mm

R_{ext1} = 152.72 mm

R_{ext2} = 61.05 mm

Distancia entre cordones solapados = 1.44 mm

Ilustración 41: Diseño del segundo ensayo

Se han cambiado los radios interiores 1 y 2, y la distancia entre cordones solapados para que no haya tanta diferencia de crecimiento por zonas. Se trasladará el punto de inicio-final al marcado en la figura, siendo su punto de salida diferente al de llegada y crear así menos error de acumulación de material en el punto. La estrategia aplicada sigue siendo la misma, con la diferencia del cambio de sentido entre capa y capa. En la primera capa el programa se ejecutará en sentido positivo de Y, mientras que, en la siguiente capa, realizará la misma geometría en sentido negativo de Y. La altura de la capa, se establecerá en 0.25 mm.

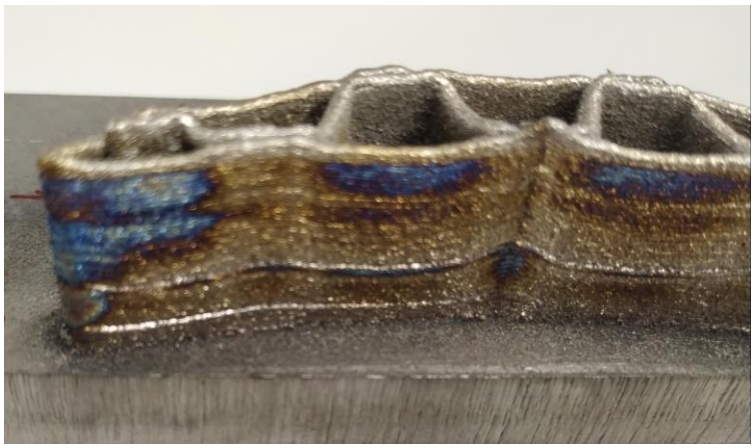


Ilustración 42: Pieza ensayo 2

Tras realizar este ensayo, se observan los siguientes defectos en la pieza aportada:

1- En este ensayo se alcanzará una altura mayor que en el anterior, pero al ser peor la evacuación de calor con la altura, se observa un aumento de oxidación a medida que la pieza crece.
2- El defecto de inicio-final se ha reducido, pero sigue estando presente. Hay una gran diferencia de altura en la zona.
3- El proceso no es totalmente estable y el solape sigue siendo ligeramente superior al deseado, por lo que hay un crecimiento desigual de la pieza, pero menor a la del ensayo anterior.

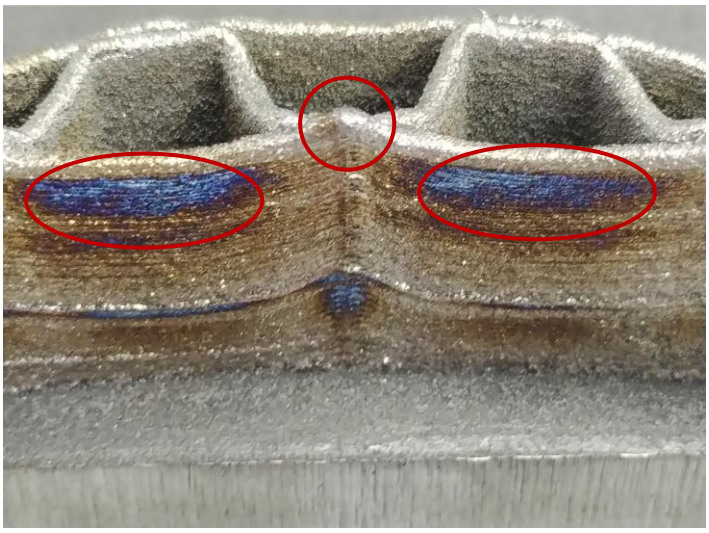


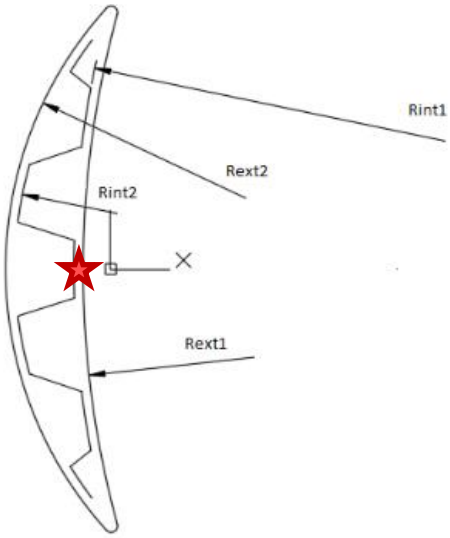
Ilustración 43: Defectos de la pieza 2

En la ilustración mostrada, se pueden observar los defectos anteriormente observados representados mediante el círculo y las elipses rojas. En ellas se ven claramente la oxidación producida y el defecto de inicio-final. Con más dificultad se observa la diferencia de crecimiento en las zonas bi-cordón de la pieza, en la parte superior de la imagen.

De cara al tercer ensayo, se intentarán corregir estos errores de la misma manera, ya que al ser este un proceso muy delicado, las correcciones se realizan prácticamente de manera experimental. Por lo tanto, se reajustará el diseño y los parámetros de aporte y se realizarán algunos cambios en la estrategia de aporte para el siguiente ensayo.

Tercer ensayo

Con el objetivo de corregir los errores sucedidos en la etapa anterior, se tomará un conjunto de medidas para este tercer ensayo. Por una parte, se mantendrán los radios interiores y exteriores del diseño del álabe.



Parámetros del ensayo

R_{int1} = 154.14 mm

R_{int2} = 59.6 mm

R_{ext1} = 152.72 mm

R_{ext2} = 61.05 mm

Distancia entre cordones solapados = 1.44 mm

Por otra parte, se ajustará el punto de inicio-final capa a capa en función del crecimiento del punto con respecto al resto de la pieza. El punto de inicio de la estructura interna se situará en un punto intermedio del interior para evitar que el defecto de inicio-final se sume al fenómeno del solape en la zona bi-cordon. Se reducirá la potencia en capas de porte sucesivas para minimizar la oxidación debida al aumento de temperatura y se aumentará la velocidad de aporte en las zonas bi-cordón de la estructura interior para reducir el ancho del cordón y así, la altura alcanzada en estas zonas. Por último, se tratará de crear una atmósfera semiprotegida con el fin de disminuir todo lo posible el efecto de la oxidación.

Ilustración 44: Pieza ensayo 3

En este ensayo se nota una mejora del proceso, aunque no se consiguen reducir todas las imperfecciones de los procesos anteriores. A continuación, se analizarán los defectos observados en este ensayo:

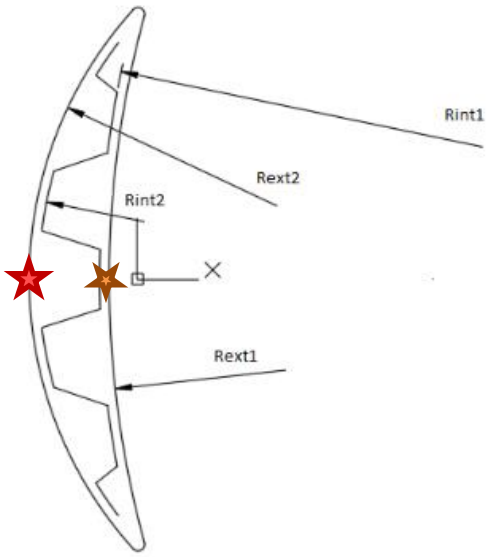
1- Al igual que en el proceso anterior, se observa una mayor oxidación a medida que la pieza aumenta de altura. Esto se debe a la mala evacuación de calor.
2- El solape es insuficiente. En planos transversales se observa que la unión entre cordones adyacentes no es buena.
3- El proceso no es totalmente estable. Se aprecia una ligera ondulación en capas intermedias, pero esta no se corrige del todo al crecer la pieza.

Ilustración 45: Defectos de la pieza 3

Como se puede comprobar en la imagen anterior, los resultados son mejores, pero se tratarán de solucionar en el cuarto y último ensayo. De cara al cuarto ensayo, se adoptarán nuevas medidas para crear una atmósfera inerte mayor y se reajustarán los parámetros del aporte. No así los parámetros del diseño, que se han dado por válidos en estos dos últimos ensayos.

Cuarto ensayo

En el cuarto ensayo, se realizarán cambios en la estrategia de aporte. Se trasladará el punto de inicio-final a una zona monocordón para que el aumento excesivo de altura de capa debido al solape en zonas bi-cordón no se sume al defecto de inicio-final.



<u>Parámetros del ensayo</u>

R_{int1} = 154.14 mm

R_{int2} = 59.6 mm

R_{ext1} = 152.72 mm

R_{ext2} = 61.05 mm

Distancia entre cordones solapados = 1.44 mm

La reducción de potencia será más rápida, y esta se ajustará en base al estado final de oxidación del ensayo anterior. En esta pieza, la geometría se complicará con la altura, ya que a partir de

cierta capa se introducirá una torsión para dotar al álabe de una forma más realista. El avance se ajustará a medida que la pieza crezca en altura, dejando enfriar la pieza unos minutos entre ejecución y ejecución. Inicialmente se aportará en capas de 1 mm y 0.5 mm para minimizar la oxidación de la pieza.

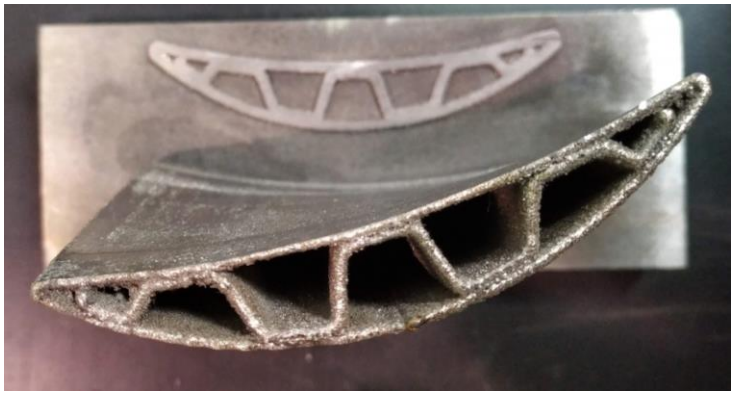


Ilustración 46: Pieza ensayo 4

Los resultados obtenidos en este ensayo son bastante mejores que en los anteriores. Se puede comprobar que el crecimiento desigual disminuye, aunque esto se debe a correcciones que se han ido realizando a media que la pieza crecía debido a que el crecimiento por capa no se ajustaba a lo que se había previsto. Por tanto, los parámetros se han ido modificando a lo largo del ensayo.

Los defectos de la pieza se muestran en la siguiente figura:

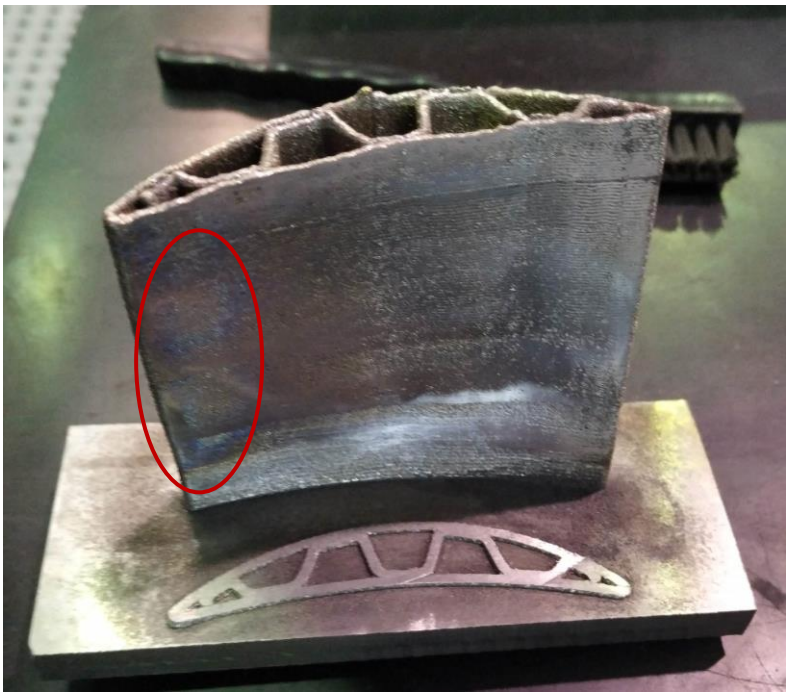


Ilustración 47: Defectos pieza 4

La pieza muestra signos de oxidación en la zona destacada y un crecimiento en el punto de inicio-final. También se puede destacar la inestabilidad de la pieza en ciertas zonas. Una vez aportadas todas las capas, se introducirán los datos de los aportes y sus características en una tabla que recoja toda la información del proceso (véase el anexo I). En la tabla de datos se muestran los parámetros adoptados inicialmente y las correcciones realizadas en el transcurso del ensayo.

Estas correcciones, se deben a crecimientos diferentes a los calculados previamente. En la capa 52 la altura debería haber sido de 36 mm y tras medirlo con el calibre en varios puntos de la pieza, se ha medido una altura de 38.1 mm, es decir, la pieza ha crecido 2.1 mm más de lo calculado. Esto se debe a una pérdida de distancia focal del láser a la hora de realizar el aporte y es por eso que se anota en la tabla ese crecimiento de más y se reajusta la distancia focal para los próximos aportes. Este reajuste se vuelve a realizar hasta dos veces más, en las capas 92 y 118, obteniendo un crecimiento extra de 6 mm, sobre una previsión de 70 mm de altura total.

En este ensayo, la pieza final ha alcanzado una altura de 76 mm, mostrando unos resultados prometedores que se analizarán a continuación, analizando la microestructura del álabe. Para ello, se seguirá un procedimiento muy parecido al que se realizó previamente en los ensayos de los cordones.

Ilustración 48: Pieza final

Análisis de la microestructura

Para analizar la microestructura del álabe hay que cortar una zona de la pieza de especial interés para analizar, encapsular esa pieza y obtener la probeta, lijarla y pulirla, atacarla y finalmente observar su microestructura en el microscopio.

Corte y encapsulado de la pieza

El corte de esta pieza será más delicado que el de los cordones ya que la geometría es más compleja. Primero se realizará un corte por la zona superior del álabe, de cierta altura. Después, se seleccionará en ese corte la zona que se desea encapsular para su posterior análisis y se cortará.

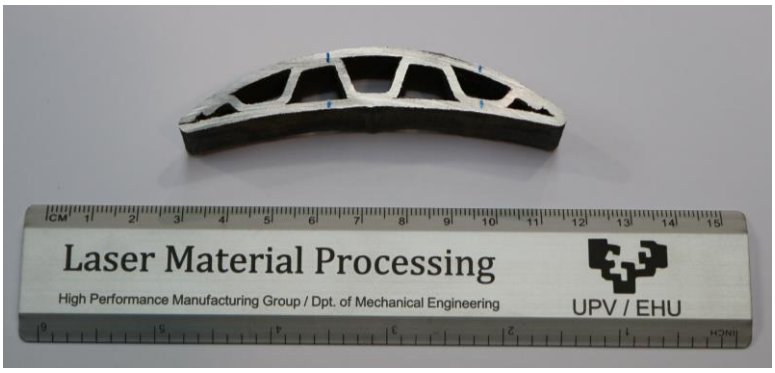


Ilustración 49: Primer corte

Como se puede comprobar en la imagen, se ha seleccionado una zona intermedia para ver bien la microestructura en las zonas bi-cordón de la pieza y analizar la calidad del aporte y el solape en esas zonas de especial interés.

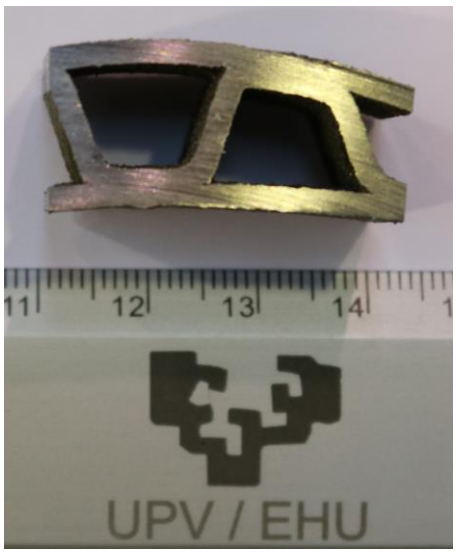


Ilustración 50: Segundo corte y encapsulado de la pieza

Lijado y pulido

Tras encapsular la pieza, se procederá a lijarla y pulirla, con el mismo método que el utilizado para los aportes de los cordones, pero con diferentes lijas. Esta vez se utilizarán unas lijas desechables, válidas para un único uso.

(preguntar por las lijas y sacar una foto)

El proceso de pulido será idéntico al caso anterior, realizando el ataque con el mismo reactivo químico. Finalmente, antes de mirar la estructura microscópica en el microscopio, se mostrará el resultado de la probeta tras las operaciones mencionadas. En esta imagen se puede observar a simple vista la microestructura de la pieza.

Ilustración 51: Probeta pulida y atacada

Microscopía

Finalmente se obtendrán las fotos de la superficie de la probeta en el microscopio Leica y se procederá al análisis de la misma mediante LeicaMAP.

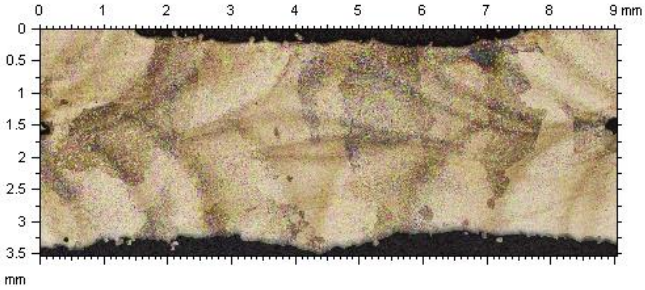


Ilustración 52: Zona bicordón inferior

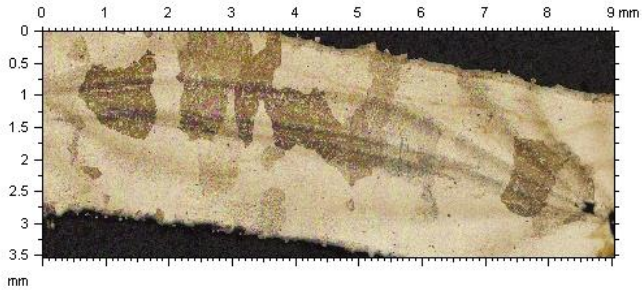


Ilustración 53: Zona bicordon superior

En las imágenes anteriores se muestran las dos zonas de especial interés para su estudio, los solapes entre los cordones de la geometría exterior e interior del álabe. Las zonas inferior y superior hacen referencia a la ilustración 45.

7. Descripción de tareas. Diagrama de Gantt

A continuación, se definirán las diferentes etapas en las que se ha dividido el proyecto a lo largo del curso. Se especificará el tiempo que ha sido necesario para la ejecución de cada tarea, anotando las fechas importantes en el diagrama de Gantt. Este documento se mostrará al final del mismo apartado.

Estas son las tareas que se llevarán a cabo en el estudio:

Documentación previa a la investigación

Es el primer paso a realizar en el proyecto. El alumno deberá informarse sobre el proceso LMD para adquirir los conocimientos básicos para proceder al estudio. Para ello deberá leer y estudiar contenido proporcionado por los coordinadores del proyecto sobre el LMD, los materiales sobre los que se va a aportar, el funcionamiento de un láser etc. También deberá buscar documentación referente al estudio en internet, en otros proyectos o congresos de empresas interesadas en la investigación.

Planificación del proyecto

A raíz del conocimiento adquirido y la información recopilada en la etapa anterior, se decidirán los ensayos que se llevarán a cabo a lo largo del proyecto, para obtener los resultados necesarios para la investigación. También se decidirán la estrategia que se llevará a cabo en los ensayos y con qué materiales se harán.

Preparación de los ensayos

En esta etapa se realizarán las operaciones necesarias previo a la realización de los ensayos. Estas operaciones incluyen la preparación del sustrato, la configuración de los programas que se ejecutarán en el láser, la calibración de la boquilla, la calibración del alimentador de polvo y la configuración de parámetros para el correcto funcionamiento del láser.

Realización de los ensayos

Al finalizar la etapa anterior, se realizarán los ensayos. En esta etapa, se tendrán en cuenta los pasos definidos en el apartado de la metodología, que incluyen tanto el proceso de aporte por láser en el centro de procesamiento, como la posterior preparación de las probetas para su análisis de la microestructura.

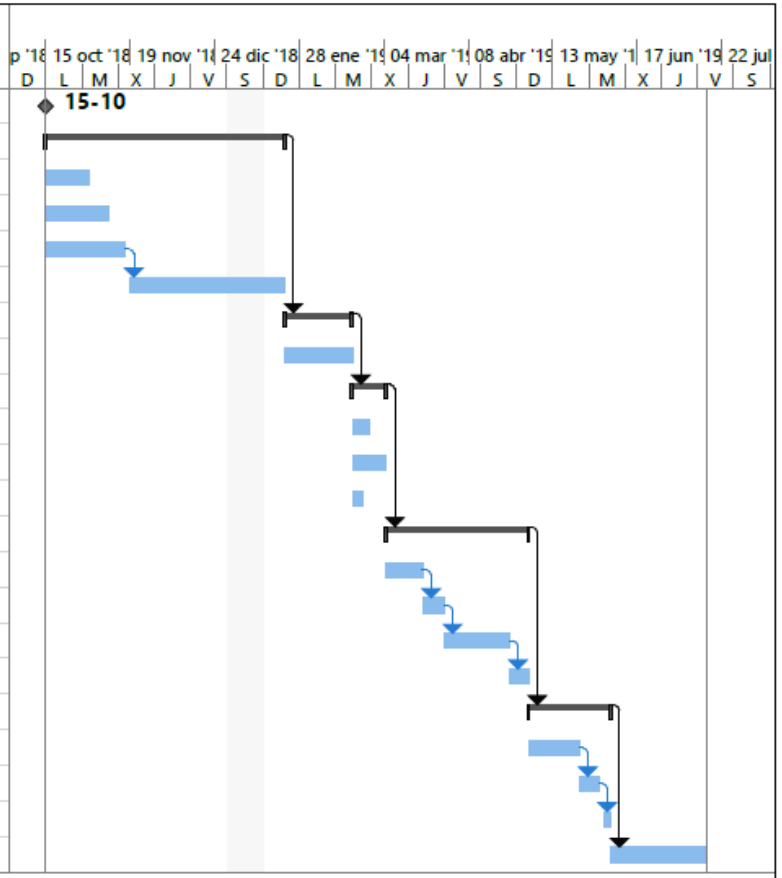
Recopilación y análisis de datos

Se recogerá toda la información de los cordones aportados en el primer ensayo y se ordenará toda esa información en esa tabla con objeto de facilitar la comprensión. Se obtendrán todas las fotos de las microscopías de las probetas y se analizarán las microestructuras de las mismas. Con los conocimientos adquiridos con anterioridad a la realización de los ensayos y ayuda del personal del departamento si se requiere, se obtendrán los resultados de los ensayos y se redactarán las conclusiones del estudio.

Redacción del trabajo de fin de grado

Finalmente, en esta última etapa se documentará todo el proceso que se ha llevado a cabo a lo largo del curso, creando un documento que lo acredite y que concluirá el estudio de grado del alumno.

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
1		1 Inicio del proyecto	0 días	lun 15-10-18	lun 15-10-18
2		**2 Documentación previa a la investigación**	**55 días**	**lun 15-10-18**	**lun 21-01-19**
3		2.1 Bibliografía sobre LMD	14 días	lun 15-10-18	jue 01-11-18
4		2.2 Asistir al taller y observar proyectos	20 días	lun 15-10-18	vie 09-11-18
5		2.3 Aprendizaje de uso de las máquinas	25 días	lun 15-10-18	vie 16-11-18
6		2.4 Prestar ayuda básica en otros proyectos	30 días	lun 19-11-18	lun 21-01-19
7		**3 Planificación del proyecto**	**20 días**	**mar 22-01-19**	**lun 18-02-19**
8		3.1 Decisión de ensayos y estrategias	20 días	mar 22-01-19	lun 18-02-19
9		**4 Preparación del ensayos**	**10 días**	**mar 19-02-19**	**lun 04-03-19**
10		4.1 Preparación del sustrato	5 días	mar 19-02-19	lun 25-02-19
11		4.2 Calibración y programación del láser	10 días	mar 19-02-19	lun 04-03-19
12		4.3 Limpieza de tolva e introducción de polvo	4 días	mar 19-02-19	vie 22-02-19
13		**5 Realizacion del ensayos**	**34 días**	**mar 05-03-19**	**jue 02-05-19**
14		5.1 Aporte de los cordones y blade	11 días	mar 05-03-19	mar 19-03-19
15		5.2 Cortar y encapsular	7 días	mié 20-03-19	jue 28-03-19
16		5.3 Lijar y pulir	10 días	vie 29-03-19	mié 24-04-19
17		5.4 Analizar microscopía	6 días	jue 25-04-19	jue 02-05-19
18		**6 Recopilación y análisis de datos**	**24 días**	**vie 03-05-19**	**mié 05-06-19**
19		6.1 Análisis de los cordones y del blade	15 días	vie 03-05-19	jue 23-05-19
20		6.2 Selección de características	6 días	vie 24-05-19	vie 31-05-19
21		6.3 Obtención de conclusiones	3 días	lun 03-06-19	mié 05-06-19
22		**7 Redacción del trabajo de fin de grado**	**28 días**	**jue 06-06-19**	**lun 15-07-19**



Tarea | Tarea inactiva | Informe de resumen manual | Hito externo
División | Hito inactivo | Resumen manual | Fecha límite
Hito | Resumen inactivo | solo el comienzo | Progreso
Resumen | Tarea manual | solo fin | Progreso manual
Resumen del proyecto | solo duración | Tareas externas

Página 1

8. Presupuesto

En este apartado se detallarán los costes que el Departamento de Mecánica deberá afrontan para llevar a cabo este estudio.

Recursos humanos

Tabla 3: Costes de recursos humanos

HORAS INTERNAS	SALARIO	TIEMPO	TOTAL
Ingeniero senior	55 €/h	75 h	4.125 €
Alumno de ingeniería	20 €/h	200 h	4.000 €
Técnico del taller	30 €/h	50 h	1.500 €
			9.625 €

Total recursos humanos	9.625 €

Recursos materiales

Amortizaciones

Tabla 4: Coste de amortizaciones

MAQUINARIA	COSTE POR HORA	TIEMPO	TOTAL
Centro láser	27.5 €/h	30 h	825 €
Rectificadora	2.35 €/h	10 h	23.5 €
Pulidora	0.25 €/h	70 h	17.5 €
Encapsuladora	0.75 €/h	6 h	4.5 €
Sierra metalográfica	0.71 €/h	9 h	6.42 €
Microscopio Leica	25 €/h	10 h	250 €
Ordenador	0.05 €/h	100 h	5 €
Licencia Microsoft Office	0.07 €/h	100 h	7.5 €
Licencia CAD/CAM	1 €/h	20 h	20 €
Licencia LeicaScan	1 €/h	20 h	20 €
			1.179,42 €

Gastos

Tabla 5: Coste de gastos

MATERIALES	COSTE	TOTAL
Barras de Ti-6Al-4V	500 €	500 €
Polvo metálico Ti-6Al-4V	500 €	500 €
Disco de corte para titanio	80 €	80 €
Lijas de diamante	200 €	200 €
Lijas desechables	50 €	50 €
Paños para pulido	100 €	100 €
Spray de diamante	100 €	100 €

Resina para encapsular	30 €	30 €
Ataque químico Kroll	50 €	50 €
Gas Argón 2X	300 €	300 €
Papelería	25 €	25 €
Elementos de seguridad	150 €	150 €
		2.085 €

Total gastos + amortizaciones	3.264,42 €

Tabla 6: Presupuesto final

SUBTOTAL 1 (Costes directos)		12.889,42 €
Costes indirectos	7%	902,26€
SUBTOTAL 2 (Costes totales)		13.791,67 €
Imprevistos	10%	1.379,17 €
SUBTOTAL 3		15.170,84 €
Costes financieros	4%	606,83 €
TOTAL		**15.777,67 €**

A lo largo de este proyecto, trabajarán en el dos ingenieros y un técnico de taller, cuyo coste total respecto a horas internas, sumará un total de 9.625 €.

En cuanto a las amortizaciones, se ha calculado el coste por hora que supone el uso de cada máquina y se ha estimado el valor en relación a la cantidad de horas que se van a invertir en ellas. El coste total de las amortizaciones será de 1.172,49 €. En cuanto a los gastos, se han tenido en cuenta los materiales que se utilizarán en los ensayos y los elementos que componen las medidas de seguridad que hay que tomar para realizar las operaciones, sumando un total de 2.085 €.

La suma de los costes directos es de 12.889,42 €. A este importe, se ha decidido adjudicarle un porcentaje de costes indirectos del 7%, que tendrá en cuenta el consumo energético de todas las máquinas utilizadas durante el ensayo tanto de luz como de agua. Sumando esta cantidad, los costes totales ascienden a 13.791,67€. A estos costes totales, se les ha asignado un porcentaje de imprevistos del 10% por los obstáculos que puedan aparecer en cuanto a tiempo de operación y materiales necesarios para los ensayos.

Finalmente, aplicando un 4% del subtotal 3 como costes financieros, se obtendrá el presupuesto final del proyecto, que supondrá un coste total de 15.777,67 €.

9. Análisis de Riesgos

En este apartado, se tratará de determinar cuáles son los riesgos de los ensayos que se llevarán a cabo, y cuantificar las consecuencias que estos riesgos pueden conllevar.

9.1 Riesgos en cuanto a objetivos

El proyecto se lleva a cabo con el objetivo de realizar diferentes ensayos y obtener los datos esperados para llegar a conclusiones positivas y poder demostrar mediante una pieza real las conclusiones previas. Eso no siempre sucede. Existe el riesgo de obtener conclusiones negativas a raíz de los ensayos, ya sea porque no aportan nada nuevo a lo que ya se sabía, o descubrir que no se puede hacer lo planeado con los ensayos. Esto supondría un desperdicio de tiempo y dinero.

Otro de los riesgos podría ser el hecho de escoger una estrategia inadecuada para el análisis de los ensayos. Es decir, haber definido una estrategia no válida para trabajar en unas condiciones dadas con la aleación de titanio, obteniendo unos resultados negativos pudiendo ser estos positivos con otra metodología aplicada.

El tercer riesgo de este proyecto podría ser la insuficiencia de ensayos. A la hora de caracterizar el cordón, lo ideal sería realizar el mayor número posible de ensayos para determinar con más exactitud las características óptimas de aporte. Eso es imposible debido al tiempo que supondría y por eso se ha decidido hacer una cantidad concreta de aportes. Por otro lado, en el aporte del álabe se podría seguir corrigiendo los parámetros de aporte y realizando nuevos ensayos, con intención de corregir los resultados anteriores y obtener unos mejores.

Tabla 7: Análisis de riesgos de objetivos

Riesgo	Impacto	Probabilidad	Acción correctora
No obtener los resultados esperados	4	3	Replantear el estudio escogiendo otra manera de llegar a los resultados deseados
Elección inadecuada de la estrategia	4	2	Estudiar una manera diferente de hacer los ensayos y volver a hacerlos
Insuficiencia de ensayos	3	2	Realizar más ensayos para obtener los datos suficientes

Tanto en esta tabla como en las siguientes, se numerarán los riesgos con una puntuación de 1 como muy poco probable o un impacto muy leve y 5 como muy probables y un impacto crítico sobre el proyecto.

9.2 Riesgos en los materiales

Los materiales con los que se va a tratar en los ensayos, son sumamente peligrosos para la salud de las personas. Por tanto, va a ser necesario el uso de elementos de protección para la prevención de los daños que los materiales puedan causar.

El polvo de Ti-6Al-4V es muy peligroso por dos motivos. Es probable que se incendie durante su manipulación si no se hace con delicadeza y es cancerígeno si se inhala o se ingiere. Por estos motivos, hay que extremar las precauciones al manipularlo, llevando guantes en todo momento para que el polvo no quede adherido en las manos y por accidente después acabe en los ojos o en la boca. También habrá que llevar máscara, para no inhalar el polvo durante su manipulación.

El elemento químico con el que se realiza el ataque, también requiere tomar precauciones durante su uso. Este líquido es corrosivo para la piel, produciendo quemaduras. Es tóxico si se inhala o ingiere y puede llegar a causar mareos si su uso es prolongado. Por lo tanto, habrá que llevar guantes en todo momento, utilizando también una máscara y unas gafas para evitar posibles salpicaduras de este líquido sobre la cara.

El gas Argón 2X que se utilizará a lo largo de los ensayos, puede provocar asfixia en un recinto cerrado en caso de fuga.

Tabla 8: Análisis de riesgos en materiales

Material	Impacto	Probabilidad	Prevención
Polvo Ti-6Al-4V	5	1	Sí
Ataque químico Kroll	5	1	Sí
Gas Argón	3	1	-

9.3 Riesgos en las máquinas

Los riesgos en las máquinas incluyen riesgos para la salud de la persona que la está manipulando, o riesgos de averías en las máquinas produciendo daños materiales. Por ello, las máquinas tienen sus propias medidas de seguridad a seguir para prevenir los daños que puedan ocasionar.

Para el funcionamiento del generador láser, el refrigerador debe estar conectado para disipar el calor generado por el generador. Si este llegara a sobrecalentarse, el refrigerador solucionaría el problema. Si el refrigerador no estuviera conectado, el generador no se pondría en marcha por seguridad.

La sierra metalográfica dispone de una caja de plástico que debe estar cerrada para que el motor de la sierra se ponga en marcha. Así se evita que pueda haber algún corte accidental o impacto por chispas. Lo mismo sucede en la rectificadora, esta no funcionará si el panel de protección no está situado en frente de la pieza a rectificar para evitar impactos de virutas en el proceso de rectificado.

El centro de procesamiento láser es el elemento más peligroso por la emisión del haz láser. Esta máquina solamente funcionará si la puerta está cerrada y es por eso que se dispone de una cámara de video y un monitor para ver lo que sucede dentro, ya que, si el láser impactara contra

el ojo humano, produciría una pérdida de visión irreversible. En el caso de tener que realizar alguna operación con la puerta abierta y el láser encendido, habrá que desalojar el taller y la persona que realice las operaciones necesarias deberá llevar unas gafas especiales durante el mantenimiento.

Tabla 9: Análisis de riesgo en las máquinas

Máquina	Impacto	Probabilidad	Prevención
Centro de procesamiento láser	5	1	Sí
Generador láser	5	1	Sí
Sierra metalográfica	3	2	Sí
Rectificadora	2	3	Sí

10. Conclusiones

La conclusión principal de este proyecto es la siguiente: Es posible crear un álabe de titanio de geometría compleja mediante LMD.

Para ello primero se ha caracterizado el material y se ha obtenido una horquilla de parámetros válidos para proporcionar un cordón estable, sin poros ni grietas. Estos parámetros tendrán en cuenta un crecimiento en altura de un tercio respecto a la anchura del cordón, un ángulo de mojado menor de 45° y un diámetro de haz láser lo menor posible para la mínima difusión de calor. Dentro de ese rango de parámetros, el cordón aportado que cumpla con las condiciones establecidas, será adecuado para proporcionar un crecimiento estable capa por capa, que no muestre imperfecciones a lo largo del proceso.

Por otro lado, tras los diferentes ensayos realizados a la hora de fabricar un álabe con geometría compleja, se ha determinado una estrategia válida que, junto a las características de cordón seleccionadas, han dado como resultado una pieza de buena calidad. En la microscopía de esta se observa una superficie homogénea, sin apenas grietas, poros o imperfecciones y con un solape adecuado. Esto quiere decir que la estructura interna del álabe es adecuada, fabricada mediante LMD.

Este resultado se ha obtenido gracias a las sucesivas correcciones que se han realizado en el aporte, disminuyendo la velocidad en las zonas bicordon para obtener un solape adecuado y disminuir el crecimiento excesivo de la pieza en dicha zona, regulando la potencia a medida que se aumenta el número de capas para alcanzar una menor temperatura en el aporte, ya que cuando este se calienta y enfría de una capa a otra, al evacuar peor el calor, la temperatura inicial en la capa siguiente es superior y la temperatura final alcanzada es mayor.

En cuanto a las características superficiales, tras realizar los ensayos se han ido solucionando la mayoría de problemas como el crecimiento irregular por zonas o el defecto de inicio-final. Se observa una capa de óxido sobre la pieza en bruto, fruto de la mala evacuación de calor que sufre el proceso al aumentar en altura el álabe. Esta capa de óxido es superficial y no afecta a la estructura interna del álabe, siendo de un espesor de 60 μm. Al ser el óxido de una profundidad tan pequeña, se podrá eliminar con un posterior proceso de mecanizado, quedando el álabe de titanio libre de óxido.

De cara a ensayos futuros, los resultados se podrán mejorar utilizando estrategias diferentes como la creación de una atmósfera inerte más efectiva, dificultando así la reacción del titanio con el oxígeno, o estableciendo algún método de evacuación de calor, como podría ser la aplicación de una pasta térmica o una estrategia diferente de aporte que dejara más tiempo de enfriado entre capa y capa. Estas medidas proporcionarían una pieza con menos defectos y un crecimiento más controlado.

11. Bibliografía

[1] Toyserkani, E.; Khajepour, A.; Corbin, S. *Laser Cladding,* 1ª ed.; CRP Press LLC: Boca Raton, Florida 22321, USA, 2005

[2] Lenntech. es. (s.f.). Argón (Ar) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. Recuperado 8 febrero, 2018, de https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ar.htm

[3] Markaida Ormaetxea, Jon; *Evaluación de la influencia del tipo de gas en el proceso de aporte por láser*, Universidad del País Vasco, Bilbao, 2018

[4] Ruiz Salas, Jose Exequiel; *Fabricación de boquilla para laser cladding*, Universidad del País Vasco, Bilbao, 2015

[5] Rofin Laser Macro. *Catálogo Serie FL;* ROFIN-SINAR Laser GmbH; Hamburgo, Alemania, 2011

[6] Oerlikon Metco. *Ficha de datos de seguridad;* Oerlikon Metco Europe GmbH; Kelsterbach, Alemania, 2016

[7] Praxair Argon Product Data Sheet; Praxair, Inc.: Danbury, USA, 2018

[8] Oerlikon Sultzer Metco Twin Product Data Sheet; Sultzer Metco Inc.: 2000

[9] Ti-6Al-4V Technical Data Sheet; NeoNickel, UK, 2019

12. Anexos

12.1 Anexo I

Ejecución #	Altura inicial (mm)	Giro inicial #	Potencia (W)	Avance (%)
1	0	0	700	100
2	1	0	650	100
3	2	0	600	100
4	3	0	550	100
5	4	0	500	100
6	5	0	500	100
7	6	0	450	100
8	7	0	450	100
9	8	0	450	100
10	9	0	450	100
11 (giro por capa on)	10	0	450	100
12	11	4	400	100
13	12	8	400	100
14	13	12	400	100
15	14	16	400	100
16	15	20	350	100
17	16	24	350	100
18	17	28	300	100
19	18	32	300	100
20	19	36	300	100
21	20	40	300	100
22	21	44	300	100
23	21.5	46	300	100
24	22	48	300	100
25	22.5	50	300	100
26	23	52	300	100
27	23.5	54	300	100
28	24	56	300	100
29	24.5	58	300	100
30	25	60	300	100
31	25.5	62	300	100
32	26	64	300	100
33	26.5	66	300	100
34	27	68	300	100
35	27.5	70	300	100
36	28	72	300	100
37	28.5	74	300	100
38	29	76	300	100
39	29.5	78	300	100
40	30	80	300	100
41	30.5	82	300	100
42	31	84	300	100
43	31.5	86	300	100
44	32	88	300	100
45	32.5	90	300	100
46	33	92	300	100
47	33.5	94	300	100
48	34	96	300	100
49	34.5	98	300	100
50	35	100	300	100
51	35.5	102	300	100
52	36+2.1	104	300	90
53	36.5+2.1	106	300	90
54	37+2.1	108	300	90
55	37.5+2.1	110	300	
56	38+2.1	112	300	
57	38.5+2.1	114	300	
58	39+2.1	116	300	
59	39.5+2.1	118	300	

60	40+2.1	120	300	
61	40.5+2.1	122	300	
62	41+2.1	124	300	
63	41.5+2.1	126	300	
64	42+2.1	128	300	
65	42.5+2.1	130	300	
66	43+2.1	132	300	
67	43.5+2.1	134	300	
68	44+2.1	136	300	
69	44.5+2.1	138	300	
70	45+2.1	140	300	
71	45.5+2.1	142	300	
72	46+2.1	144	300	
73	46.5+2.1	146	300	
74	47+2.1	148	300	
75	47.5+2.1	150	300	
76	48+2.1	152	300	
77	48.5+2.1	154	300	
78	49+2.1	156	300	
79	49.5+2.1	158	300	
80	50+2.1	160	300	
81	50.5+2.1	162	300	
82	51+2.1	164	300	
83	51.5+2.1	166	300	
84	52+2.1	168	300	
85	52.5+2.1	170	300	
86	53+2.1	172	300	
87	53.5+2.1	174	300	
88	54+2.1	176	300	
89	54.5+2.1	178	300	
90	55+2.1	180	300	
91	55.5+2.1	182	300	
92	56+2.1+1.7	184	300	
93	56.5+2.1+1.7	186	300	
94	57+2.1+1.7	188	300	
95	57.5+2.1+1.7	190	300	
96	58+2.1+1.7	192	300	
97	58.5+2.1+1.7	194	300	
98	59+2.1+1.7	196	300	
99	59.5+2.1+1.7	198	300	
100	60+2.1+1.7	200	300	
101	60.5+2.1+1.7	202	300	
102	61+2.1+1.7	204	300	
103	61.5+2.1+1.7	206	300	
104	62+2.1+1.7	208	300	
105	62.5+2.1+1.7	210	300	
106	63+2.1+1.7	212	300	
107	63.5+2.1+1.7	214	300	
108	64+2.1+1.7	216	300	
109	64.5+2.1+1.7	218	300	
110	65+2.1+1.7	220	300	
111	65.5+2.1+1.7	222	300	
112	66+2.1+1.7	224	300	
113	66.5+2.1+1.7	226	300	
114	67+2.1+1.7	228	300	
115	67.5+2.1+1.7	230	300	
116	68+2.1+1.7	232	300	
117	68.5+2.1+1.7	234	300	
118	69+2.1+1.7+1.7	236	300	
119	69.5+2.1+1.7+1.7	238	300	
120	70+2.1+1.7+1.7	240	300	80