

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE GRADO

## *EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE GAS EN EL PROCESO DE APORTE POR LÁSER*

**Alumno:** Markaida Ormaetxea, Jon

**Director:** Lamikiz Mentxaka, Aitzol

Curso: 2017-2018

Fecha: 10 de julio de 2018

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA

ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## DATOS BASICOS DEL PROYECTO

**Alumno:** Jon Markaida Ormaetxea

**Director Técnico:** Aitzol Lamikiz Mentxaka

**Departamento:** Ingeniería Mecánica

**Título del proyecto:** Evaluación de la influencia del tipo de gas empleado en el proceso de aporte por láser.

**Plazo de ejecución:** 14/11/2017 a 12/07/2018

**Laburpena:** Laser bidezko prozesu gehigarriak, ingelesez *Laser Metal Deposition (LMD)* deiturikoak, oinarri-pieza batetik abiatuz geometria anitzetako xehetasunak sortzea ahalbidetzen du. Prozesu hau piezaren gainazala urtu eta, aldi berean, hauts formatuan dagoen materiala gehitzean oinarritzen da. Gehituriko materialaren goi kalitate metalurgikoa bermatzeko, prozesuan erabiltzen diren gasek berebiziko garrantzia daukate, hortaz proiektu honetan prozesuan konposaketa ezberdinetako gasen erabilerak eduki dezakeen eragina aztertu da. Helburu horretarako, gas anitzek LMD prozesuko tenperaturetan duten eragina neurtu da eta aztertu dira lorturiko kordoen geometria eta materialaren mikroegitura.

**Hitz gakoak:** laser; fabrikazio gehigarria; garraio gasa; babes gasa; tenperatura neurketa

**Resumen:** El proceso de aporte por láser o *Laser Metal Deposition (LMD)* es una técnica de fabricación aditiva que permite la fabricación de piezas de diversas geometrías con una alta calidad metalúrgica. Dicho proceso se basa en la generación de un baño fundido en un material base y el aporte simultáneo de material en forma de polvo metálico suministrado por un gas de arrastre. El objetivo de este proyecto es analizar la influencia del empleo de gases de distintas composiciones durante el proceso, evaluando la calidad metalúrgica del aporte final. Para tal propósito, se medirán las temperaturas con distintos gases en los procesos LMD y se analizarán las geometrías de los cordones y la micro-estructura del material.

**Palabras clave:** láser; fabricación aditiva; gas de arrastre; gas de protección; medición de temperatura

**Abstract:** Laser Metal Deposition (LMD) enables to build free-form parts with almost no geometrical restriction and high-quality metallurgy. The process is based on the generation of a melt pool on the surface of the substrate, whereas filler material in the form of metal powder is simultaneously added dragged by gas. The main objective of this project is to analyze the influence of the employment of gases with different compositions by evaluating the metallurgical quality of the clad. For this purpose, the temperatures with different gases in the LMD processes will be measured and the geometry of the cords and the microstructure of the material will be analyzed.

**Keywords:** laser; additive manufacturing; carrier gas; shielding gas; temperature measurement

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA

ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## Índice

---

1. Lista de tablas, ilustraciones y acronimos .....	7
1.1. Tablas y gráficas .....	7
1.2. Ilustraciones .....	7
1.3. Acronimos .....	8
2. Introducción .....	9
3. Objetivos.....	11
4. Alcance .....	13
5. Antecedentes.....	15
5.1. Laser Metal Deposition.....	15
5.2. Descripción de equipos y materias primas .....	18
6. Metodología .....	29
6.1. Preparación previa .....	29
6.2. Curva de enfriamiento .....	30
6.3. Realización de aportes .....	31
6.4. Obtención de gráficos de temperaturas .....	31
6.5. Creación de probetas .....	33
6.6. Microscopía.....	34
7. Resultados.....	35
7.1. Análisis de la curva de enfriamiento .....	35
7.2. Análisis metalográfico de los aportes.....	37
7.3. Análisis pirométricos de los aportes .....	40
8. Descripción de tareas. Diagrama Gantt .....	43
8.1. Descripción de tareas.....	43
8.2. Diagrama Gantt.....	45
9. Presupuesto.....	47

10. Análisis de riesgos.....	49
10.1. Análisis de riesgos de objetivos.....	49
10.2. Análisis de riesgos en máquinas y prevención .....	49
10.3. Análisis de riesgos de los materiales y su prevención .....	50
11. Discusión y conclusiones .....	51
11.1. Discusión.....	51
11.2. Conclusiones.....	52
12. Referencias.....	53
13. Anexos.....	55
13.1. Helistar 25 Data Sheet .....	55
13.2. Helistar 50 Data Sheet .....	56
13.3. Filtrado de datos Matlab .....	57

## 1. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos

### 1.1. Tablas y gráficas

Tabla 1. Composición química (%) del sustrato de Inconel 718 .....	13
Tabla 2. Composición química (%) del polvo de MetcoClad 718.....	13
Tabla 3. Composición química (%) común del Inconel 718 .....	25
Tabla 4. Composición química (%) común del polvo de MetcoCladl 718 .....	26
Tabla 5. Ensayos de aporte a 400 W de potencia láser .....	38
Tabla 6. Ensayos de aporte a 600 W de potencia láser .....	39
Tabla 7. Ensayos de aporte a 800 W de potencia láser .....	40
Tabla 8. Costes de recursos humanos.....	47
Tabla 9. Costes de amortizaciones .....	47
Tabla 10. Costes de gastos .....	47
Tabla 11. Presupuesto final .....	48
Tabla 12. Análisis de riesgo en la maquinaria del proceso.....	50
Tabla 13. Análisis de riesgo de las materias primas.....	50
Gráfica 1. Señal sin filtrar.....	32
Gráfica 2. Señal filtrada .....	32
Gráfica 3. Ensayo de curva de enfriamiento, caudal 5 L/min.....	35
Gráfica 4. Ensayo de curva de enfriamiento, caudal 10 L/min.....	36
Gráfica 5. Ensayo de curva de enfriamiento, caudal 15 L/min.....	37
Gráfica 6. Aportes con Argón 2X.....	40
Gráfica 7. Aportes con Helistar 25 .....	41
Gráfica 8. Aporte con Helistar 50 .....	41

### 1.2. Ilustraciones

Ilustración 1. Laser Metal Deposition .....	15
Ilustración 2. Planta de tratamiento de gases Praxair en Colombia.....	16
Ilustración 3. Turbina de Inconel 718 .....	17
Ilustración 4. Alimentador de polvo “Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder” .....	18
Ilustración 5. Generador láser de fibra “Rofin FL010”.....	19
Ilustración 6. Funcionamiento del generador láser de fibra .....	19
Ilustración 7. Descomposición del haz láser al contactar con el sustrato .....	20
Ilustración 8. Sistema de refrigeración “KKT Kraus OLB-5”.....	21

Ilustración 9. Mesa de posicionamiento de dos ejes x-y.....	21
Ilustración 10. Centro de procesamiento láser “Kondia Aktinos 500” .....	22
Ilustración 11. Boquilla (Nozzle).....	23
Ilustración 12. Bombonas de gas .....	24
Ilustración 13. Blisk de Inconel 718.....	25
Ilustración 14. Polvo de MetcoClad 718.....	26
Ilustración 15. Funcionamiento de pirómetro.....	27
Ilustración 16. Praxair Lutchana.....	29
Ilustración 17. Sierra metalúrgica.....	30
Ilustración 18. Rectificadora.....	30
Ilustración 19. Pirómetro y boquilla .....	30
Ilustración 20. Utilización del pirómetro.....	31
Ilustración 21. Sustratos de Inconel 718 .....	33
Ilustración 22. Lijas de pulidora metalúrgica.....	33
Ilustración 23. Características del aporte .....	34
Ilustración 24. Sección de aportes a 400 W de potencia láser .....	37
Ilustración 25. Ángulos húmedos de los aportes a 400 W de potencia láser .....	38
Ilustración 26. Sección de aportes a 600 W de potencia láser .....	38
Ilustración 27. Ángulos húmedos de los aportes a 600 W de potencia láser .....	39
Ilustración 28. Sección de aportes a 800 W de potencia láser .....	39
Ilustración 29. Ángulos húmedos de los aportes a 800 W de potencia láser .....	40

### 1.3. Acrónimos

LMD: Método de aporte por láser (*Laser Metal Deposition*).

TIG: Gas inerte de Tungsteno (*Tungsten Inert Gas*).

MIG: Gas inerte de metal (*Metal Inert Gas*).

CAD: Diseño asistido por computadora (*Computer-Aided Design*).

FEPA: Federación Europea de Productos Abrasivos.

HS25: Helistar 25.

HS50: Helistar 50.

## 2. Introducción

Los métodos tradicionales de mecanizado se basan en el arranque de viruta hasta conseguir la geometría deseada, a partir de una pieza de material en bruto. Sin embargo, existen tecnologías capaces de fabricar piezas añadiendo material a un sustrato base. Dichas técnicas son conocidas como fabricación aditiva, en contraposición a las ya mencionadas de arranque de viruta o sustractivas. Sus capacidades no solo se limitan a la creación de geometrías, sino que además son capaces de realizar reparaciones en piezas creadas por diferentes métodos de fabricación. Pese a su flexibilidad y versatilidad, esta tecnología de fabricación aun no puede alcanzar los acabados superficiales conseguidos mediante el mecanizado y, que a veces, pueden ser necesarios para la funcionalidad de las piezas.

Entre los diferentes procesos de fabricación aditiva se encuentra el proceso de aporte por láser o Laser Metal Deposition (LMD). Esta tecnología se emplea en la industria para la reparación de piezas de alto valor añadido y por lo tanto su desarrollo suscita gran interés.

El proceso Laser Metal Deposition puede efectuarse de varias maneras, y en todas ellas, se utiliza un láser de alta intensidad para fundir la superficie del sustrato y fusionar el material aportado. En estos procesos aditivos, el material se añade capa por capa hasta conseguir la geometría deseada. En el caso del LMD se puede utilizar una gran variedad de materiales y estos pueden suministrarse en forma de hilo o polvo, aunque para este proyecto, se utiliza el aporte láser por inyección de polvo únicamente. Este proceso usa dos flujos de gases independientes, uno de ellos se denomina gas de arrastre, cuya función es arrastrar el polvo hasta la zona de aporte, y por otra parte el gas de protección, el cual es necesario para proteger las lentes del láser y además inertizar la zona del aporte de posibles reacciones u oxidaciones que puedan generarse [1].

Este sistema es capaz de trabajar con aleaciones de metales en polvo, los cuales serían difíciles de mecanizar mediante los métodos tradicionales o incluso crear capas de distintos materiales para mejorar las propiedades de la pieza. Es por ello que, para garantizar la utilidad industrial del estudio, en estos experimentos, tanto el sustrato como el material de aporte, son de Inconel 718, una superaleación austenítica con base níquel, habitual en la industria aeronáutica que se emplea en las zonas de alta presión y temperatura de las turbinas de los aviones, gracias a su capacidad de mantener las propiedades mecánicas a altas temperaturas.

El proceso de Laser Metal Deposition cuenta con ciertas ventajas, aparte de las ya mencionadas, como podrían ser la reducción de tiempo de producción, ya que en muchas ocasiones simplifican la fabricación de piezas, o reducen tiempos de mecanizado. A su vez presenta una oportunidad única para la fabricación de piezas cuya geometría es imposible de conseguir por métodos más convencionales de arranque de viruta [1].

Algunas desventajas de esta tecnología pueden enmarcarse en el aspecto económico, ya que para su realización es necesario utilizar gases cuyo valor es elevado. Esta necesidad es inherente al proceso ya que se requieren gases inertes y no inflamables, los cuales habitualmente son gases nobles cuya escasez viene ligada a su coste. A pesar de todo ello, las ventajas de su empleo superan a las razones económicas y por lo tanto el proceso continúa ampliando sus horizontes en la industria. Tanto es así, que

los fabricantes de máquinas de aporte por láser, como puedan ser TRUMPF, DMG MORI o MAZAK entre otros, ya disponen en sus catálogos de equipos que incluso utilizan mezclas de gases inertes, aumentando incluso el coste del proceso. Esta tendencia es debida a necesidades del diseño de las boquillas y atienden a problemáticas de dinámica de fluidos. Sin embargo, no se aborda en ningún momento las consecuencias o efectos que puedan tener en el resultado de los aportes de material. Es por ello que se encuentra una necesidad de evaluar dichas consecuencias para las diferentes mezclas de gases que puedan emplearse en los procesos de aporte por LMD.

El estudio “Evaluación de la influencia del tipo de gas en el proceso de aporte por láser” está dirigido a dar una solución a esta necesidad. La finalidad de este proyecto es analizar, evaluando la calidad metalúrgica y las temperaturas alcanzadas durante el proceso, las diferencias que surgen al usar distintas composiciones de gases, como gas de arrastre y protección, en el proceso de LMD para el Inconel 718.

### 3. Objetivos

El objetivo de este proyecto, es analizar mediante una evaluación pirométrica y metalográfica los diferentes efectos sobre el sustrato en el proceso de aporte por láser (LMD) debido al uso de distintas mezclas de gases empleadas como gas de protección y arrastre.

- Para el estudio se emplearán distintas mezclas de gases, siendo todas ellas no inflamables ni corrosivas para el proceso. Dichos gases serán previamente seleccionados en base al estudio bibliográfico sobre los efectos que puedan tener los mismos en la soldadura láser. Este proceso guarda grandes semejanzas con el proceso de aporte láser y, por tanto, puede utilizarse como base para considerar los posibles efectos de estudio derivados del empleo de los distintos gases.
- Con esta investigación se pretenden buscar posibles mejoras o cambios como puedan ser los cambios en la profundidad de la dilución, en la geometría del cordón, en la temperatura del baño fundido, reducción de gastos o mejora técnica.

En el estudio se realizarán una serie de cordones de aporte de material, utilizando distintos parámetros y las diferentes mezclas de gases seleccionadas. Para analizar todo ello:

- Se realizarán cortes a dichos cordones y analizarán cambios en el ancho, alto, penetración de la dilución, ángulo de mojado y porosidad.
- Durante el proceso se tomará registro de la temperatura del baño fundido para su posterior comparación y análisis.

La porosidad depende de la velocidad de enfriamiento del aporte y los gases actuantes en el proceso. Si esta velocidad es muy elevada, el gas queda atrapado dentro del aporte y por lo tanto genera poros.

Como ya se ha mencionado, la temperatura del baño fundido podría verse modificada por el empleo de diferentes gases y por lo tanto la porosidad también será tomada en cuenta en el estudio.

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA

ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## 4. Alcance

Para los diferentes ensayos, se utilizarán distintos gases suministrados por la empresa Praxair con tres diferentes composiciones, Argón puro 2X como gas de referencia, con una pureza del 99,998%, Helistar 25 con una composición de un 25% de helio y un 75% de argón y Helistar 50 con una mezcla de 50% de helio y un 50% de argón.

Se empleará un láser de fibra Rofin FL010 con una potencia máxima de 1000 W, una longitud de onda de  $\lambda=1080\pm 10\text{nm}$ , una distancia focal de 200 mm y un diámetro de 1.6 mm en el spot. Este generador láser estará instalado en un centro de procesamiento láser, una Kondia Aktinos 500. Esta máquina es un antiguo centro de fresado modificado, contiene una mesa de posicionamiento de dos ejes con posibilidad de añadir dos grados de libertad angulares mediante un plato giratorio y un eje vertical en la boquilla. Dispone de un espacio de trabajo de 700x360x380 mm.

Como alimentador de polvo, se empleará un Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder, un alimentador por gravedad con dos tolvas para distintos polvos.

La medición de la temperatura se realizará con un pirómetro de dos colores digital con una fibra óptica IGAR 12-LO, el cual, enfocará al centro del spot en los distintos ensayos a realizar.

El sustrato para el aporte será Inconel 718 y el polvo que se empleará MetcoClad 718 cuyas composiciones vienen detalladas en las tablas Tabla 1 y Tabla 2[10].

Tabla 1. Composición química (%) del sustrato de Inconel 718

Ni	Cr	Nb+Ta	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Mn
52.50	18.40	5.08	5.08	3.04	1.03	0.54	0.33	0.24
Si	C	Cu	B	Ta	P	S	Fe	
0.11	0.052	0.05	0.005	<0.05	0.006	<0.002	Restante	

Tabla 2. Composición química (%) del polvo de MetcoClad 718

Cr	Mo	Nb	Fe	Ti
19.00	3.00	5.00	18.00	1.00
Si	Mn	C	B	Ni
0.20	0.08	0.05	0.005	Restante

Los cortes metalográficos se realizarán con una sierra metalográfica con un disco de corte corindón con unión de caucho, para lijar se emplearán lijas metálicas de diamante P80, P220, P600 y P1200 y para pulir paños de pulido con base metálica de 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ .

El ataque químico se efectuará con el reactivo Kalling's 2 y el análisis de la geometría con el microscopio confocal Leica DCM 3D. En este análisis se determinará la penetración de la dilución, geometría del cordón y porosidad.

Todo este proceso se repetirá 3 veces para corroborar resultados y conclusiones, así como su repetitividad.

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA

ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## 5. Antecedentes

### 5.1. Laser Metal Deposition (LMD)

En el proceso Laser Metal Deposition, se añade polvo a la vez que se funde junto con la superficie del sustrato. Se puede alimentar el material de distintas maneras como podría ser el “Wire Feeding” o aporte por hilo, pero en este proyecto se usará el “Laser Cladding by Powder Injection” o lo que es lo mismo aporte por inyección de polvo (véase Ilustración 1). En dicho proceso se alimenta el láser con polvo mediante una corriente de gas denominada gas de arrastre y mediante otro flujo del mismo gas se logra la corriente denominada como gas de protección. Este gas suele ser un gas inerte, gases tales como argón o nitrógeno, y cae sobre la superficie fundida del sustrato protegiéndola así del aire, si este suministro es interrumpido la pieza final podría tener algún defecto por la penetración de algún elemento que reaccione con el sustrato [1].

El uso de esta tecnología de fabricación aditiva está en auge estos últimos años en la industria, por ser capaz de reparar piezas defectuosas o generar geometrías complejas; además de, ser capaz de trabajar con aleaciones de acero, superaleaciones de níquel y aleaciones de titanio los cuales son difíciles de tratar mediante los métodos tradicionales.



*Ilustración 1. Laser Metal Deposition*

Como anteriormente se ha mencionado habitualmente se usan gases inertes para evitar que el sustrato reaccione o que se oxide, siendo el argón el más común de los gases en estos procesos de LMD, seguido de cerca por el nitrógeno. Esto último se debe al hecho de que el nitrógeno mayormente no reacciona y es muy económico comparándolo con el argón, pero no siempre es capaz de proteger el sustrato de las reacciones químicas, puesto que reacciona con el titanio, con el niobio o con el Vanadio.

Pero también se están dando casos de combinaciones de gases para optimizar el proceso como, por ejemplo, utilizar el argón a modo de gas de protección para evitar la entrada de oxígeno a la zona del aporte y el helio como gas de arrastre de polvo. El helio, también inerte, tiene menor densidad que el argón y evita cierto tipo de turbulencias perjudiciales al tratar de penetrar el helio con el polvo en el flujo del argón a la hora del aporte.

El mayor problema de esta última técnica es la escasa disponibilidad del helio y su alto precio en el mercado. Este gas, tal como se ha mencionado anteriormente, es un gas noble y de baja densidad, lo cual a pesar de ser beneficioso para nuestro proceso es contraproducente a la hora de extraerlo ya que volará rápidamente a la atmósfera.

El helio era un gas al cual no se le había mostrado demasiada atención hasta que hace unos veinte años comenzaron a extenderse sus aplicaciones, aplicaciones hoy en día tales como los cables de fibra óptica, las resonancias magnéticas, las pantallas LCD, los imanes superconductores, los telescopios espaciales o incluso sus usos recreativos como los globos de colores. También es muy provechoso para las soldaduras de arco y procesos similares como el que en un principio hemos mencionado por su carácter de gas inerte.

Dada la creciente escasez de este gas en la Tierra y el alto consumo en aplicaciones de alta tecnología su precio es bastante elevado comparándolo con otros gases de parecidas características como podría ser el argón.



*Ilustración 2. Planta de tratamiento de gases Praxair en Colombia*

El argón es la otra cara de la moneda del proceso anteriormente mencionado, en ese caso se utiliza únicamente como campana de protección, aunque habitualmente se utilice también como gas de arrastre. Este gas inerte, aun siendo más barato que el helio, es particularmente caro dada su forma de extracción (véase Ilustración 2) a pesar de haber un 0.934% de este gas en la atmósfera.

El primer uso del argón en grandes cantidades es en bombillas o lámparas eléctricas. Hoy en día la soldadura y el corte de metales supone la mayor parte del consumo del

argón. Las técnicas metalúrgicas constituyen la aplicación de mayor crecimiento. El argón mezclado con otros gases como vapor de mercurio, neón o mezclas de argón-kriptón se utilizan para llenados de lámparas fluorescentes o tubos fluorescentes de descarga eléctrica. El argón se utiliza también para rellenar tiratrones de los contadores de radiactividad Geiger-Müller. En la manipulación de diversos reactivos químicos de laboratorio se utiliza la atmósfera de argón, incluso a la hora de precintar estos materiales.

Tal como antes se ha mencionado, el precio del argón es especialmente alto por su forma de extracción. El mayor porcentaje de este gas noble se fabrica en plantas de separación de aire. El aire de la atmosfera se licua y se destila fraccionadamente. Puesto que el punto de ebullición del gas que queremos obtener está entre el del oxígeno y el del nitrógeno, se puede conseguir un compuesto rico en argón de las fracciones de las etapas correspondientes de la destilación. El compuesto rico en argón se vuelve destilar, se calienta y se quema catalíticamente para eliminar el oxígeno con hidrógeno. Finalmente, con una última destilación se elimina el nitrógeno e hidrógeno, logrando un argón de altísima pureza la cual contiene solamente unas pocas partes por millón de residuos o impurezas [2].

Por otra parte, se usará como sustrato el Inconel 718. Su uso en procesos aditivos de la industria está muy extendido por su utilización en la reparación de piezas de alto valor añadido sobre todo en la industria aeroespacial.

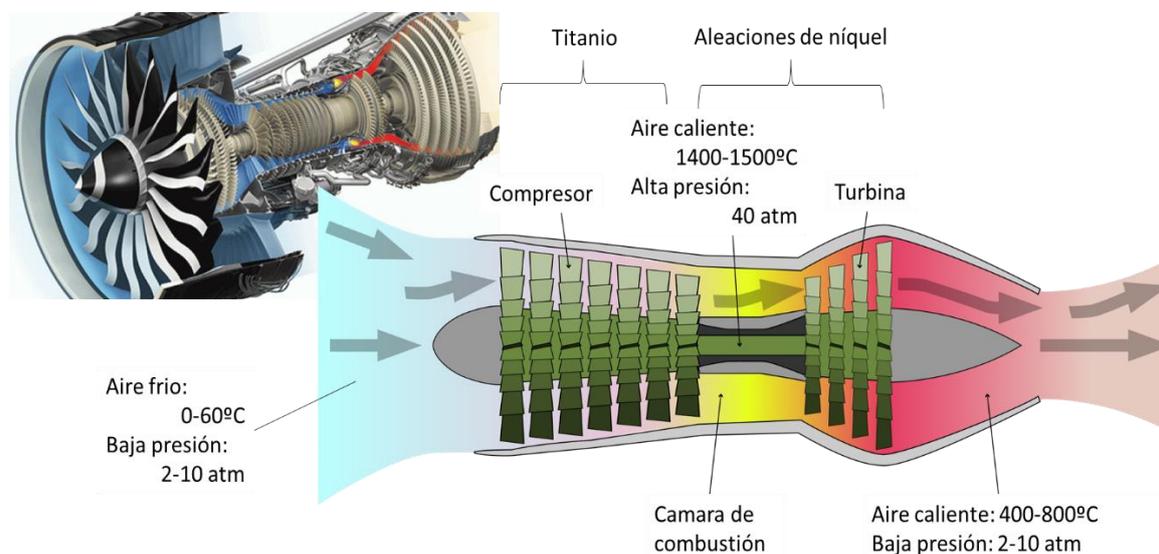


Ilustración 3. Turbina de Inconel 718

En las turbinas de los aviones, como la de la Ilustración 3, el aire entra a baja presión y temperatura y el compresor sube la presión del aire. En esta parte se utiliza el titanio por sus propiedades mecánicas y su poco peso. En la cámara de combustión la temperatura sube hasta unos 1400-1500°C, por lo que se empiezan a necesitar aleaciones de níquel, como el Inconel 718 por su capacidad de mantener sus propiedades mecánicas a altas temperaturas además de no expandirse.

## 5.2. Descripción de equipos y materias primas necesarias

El proceso LMD depende de un conjunto de equipos para su correcto funcionamiento, ya sean equipos integrados como la boquilla de LMD o equipos no integrados como el equipo de refrigeración. Además de todo ello también se utilizarán dispositivos de medición y recopilación de datos. Los elementos necesarios para la realización del ensayo son los siguientes:

### 5.2.1. Alimentador de polvo (*Powder feeder*)

Este es un elemento indispensable puesto que su función es vital. Suministra el polvo al dispositivo laser para poder fundirlo junto con la pieza. Aunque su función parezca que sea trivial, es muy importante que el suministro de polvo sea el indicado para que no haya fallos en la zona aportada.

El alimentador “Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder” consta de dos tolvas, dos discos, un caudalímetro y el panel de control. En cada tolva se almacena polvo, esta tolva se calienta previamente para eliminar la humedad y se le inyecta gas para aumentar la presión tanto en la tolva como en el disco. El polvo cae a los discos por gravedad y la presión ejercida por el gas, teniendo en cuenta que en la salida del disco la presión será menor, lo cual facilita la salida del polvo (véase Ilustración 4).

El suministro de polvo a la maquina laser se controla gracias al caudal de gas de arrastre y a las revoluciones a las que gira el disco con el polvo mediante el panel de control. Este flujo que llega hasta la maquina laser tendrá tanto polvo como gas de arrastre.



Ilustración 4. Alimentador de polvo “Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder”

### 5.2.2. Generador láser (*Laser System*)

Existen numerosos tipos de láser los cuales pueden ser clasificados por sus parámetros físicos u operativos. De acuerdo con este criterio, los distintos tipos de láser son: Láser de gas, láser de dímero excitado (*excimer laser*), láser de estado sólido, láser semiconductor, láser de colorante líquido y láser de fibra.



Ilustración 5. Generador láser de fibra "Rofin FL010"

Los parámetros más importantes del láser son el tipo de onda (continua o pulsada), la potencia, la distancia focal y el diámetro del spot o haz láser. Dependiendo del tipo de onda podrían variar los demás parámetros del láser. La potencia nos permitirá poder fundir la superficie del sustrato para añadir el polvo o si se deseara hasta cortar el propio metal, la potencia es la fuente de energía, al fin y al cabo. La distancia focal es el haz del láser, donde la luz posee el menor diámetro, donde se concentra la luz. El diámetro del spot es el diámetro que presenta la luz del láser sobre el sustrato, este diámetro no siempre será el diámetro de su distancia focal puesto que se puede utilizar de manera desenfocada para la obtención de un mayor diámetro en el sustrato.

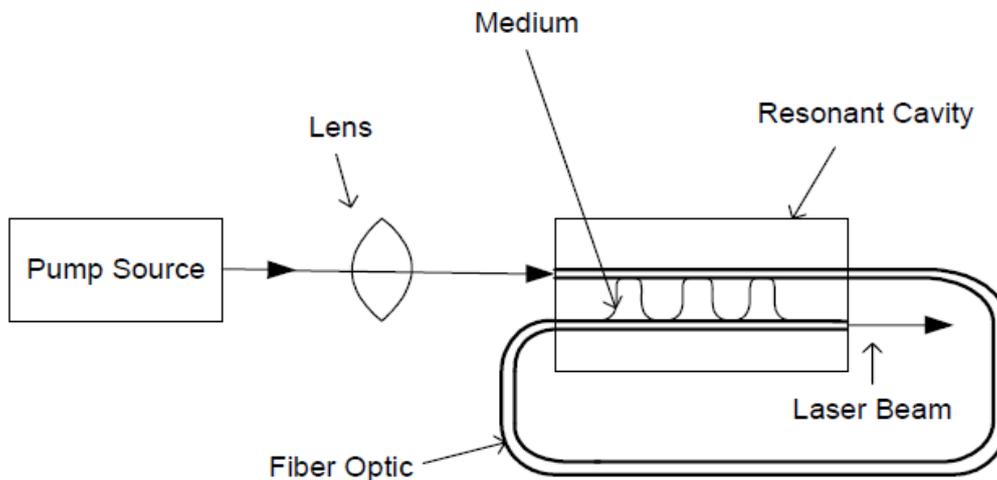


Ilustración 6. Funcionamiento del generador láser de fibra

La máquina láser del taller es un láser de fibra “Rofin FL010” (véase Ilustración 5), este tipo de láser produce pulsos muy cortos de forma resonante y los concentra mediante una lente para introducirlo en la fibra óptica (véase Ilustración 6). El láser va rebotando por la óptica y saldrá al colimador en todas direcciones. El colimador lanza todo el láser en paralelo hacia las lentes, una serie de lentes que enfocan el láser hacia un único punto [1,11].

En este experimento el haz láser estará desenfocado, más alejado que a su distancia focal de 200 mm. Esto nos permitirá un mayor diámetro en el spot, un diámetro de 1.6 mm aproximadamente.

La potencia máxima de este láser de fibra es de 1000 W y la longitud de onda es  $\lambda=1080\pm 10\text{nm}$ , esta longitud de onda hay que tenerla muy en cuenta puesto que afecta de distinta manera al cambiarla, ya que de esta propiedad depende la absorción del material.

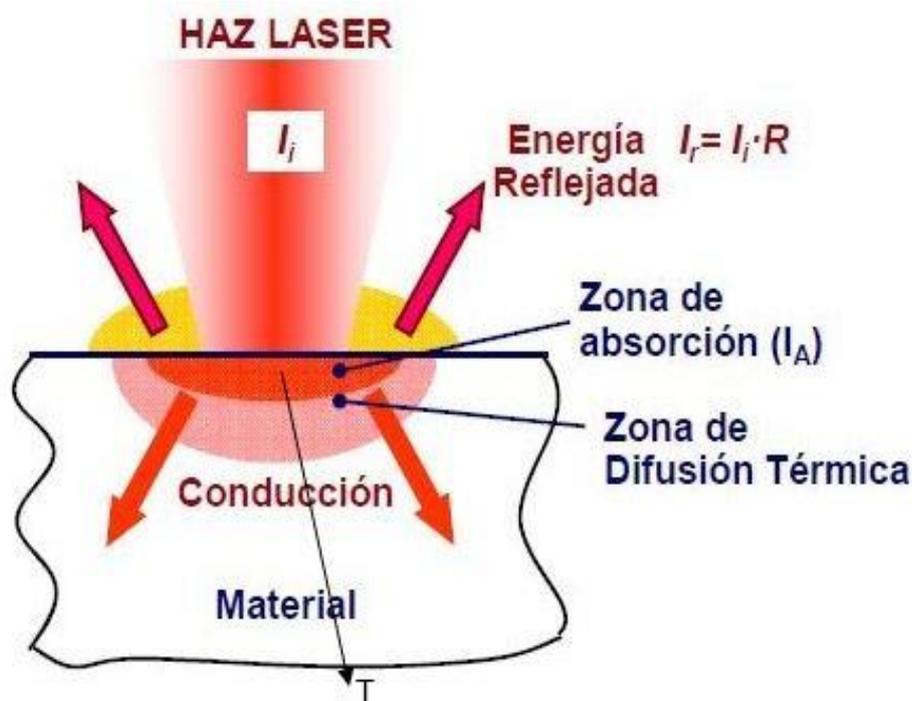


Ilustración 7. Descomposición del haz láser al contactar con el sustrato

El haz láser se descompone de tres maneras al llegar a la superficie del material: lo que refleja (R), lo que absorbe mediante conducción y lo que consigue traspasar el material (T) (véase Ilustración 7). Lo más habitual en los metales es que  $\lambda$  se descomponga mayormente en R y conducción.

### 5.2.3. Sistema de refrigeración

Dadas las altas temperaturas a las que puede llegar el generador de láser es necesario tener un equipo de refrigeración (véase Ilustración 8), de hecho, el láser no se activará, por seguridad, si el equipo de refrigeración no está activo. Este equipo “KKT Kraus OLB-5” bombea agua con el refrigerante “R 134 a” por un circuito y mediante el sistema de ventilación consiguen expulsar el calor.



Ilustración 8. Sistema de refrigeración “KKT Kraus OLB-5”

### 5.2.4. Mesa de posicionamiento de dos ejes X-Y

El equipo consta de una mesa (véase Ilustración 9) con movimiento en dos ejes X e Y para poder realizar los aportes con precisión, el eje Z está en la misma boquilla la cual bajará y subirá dependiendo de la necesidad. Para realizar un aporte es necesario el movimiento relativo entre la pieza y la boquilla y esta puede llegar a producirse de diversas maneras, ya sea moviendo solo la pieza, moviendo solo la boquilla o bien moviendo ambas como es el caso.

Si fuese necesario añadir movimientos angulares a la pieza sería posible instalar un plato giratorio el cual añadiría otros dos grados de libertad al sistema.



Ilustración 9. Mesa de posicionamiento de dos ejes x-y

### 5.2.5. Centro de procesamiento láser

Todos los ensayos son llevados a cabo en el centro de procesamiento láser del taller del Departamento de Ingeniería Mecánica, se trata de una “Kondia Aktinos 500” (véase Ilustración 10). Esta máquina es un antiguo centro de mecanización modificado, más concretamente, un antiguo centro de fresado.

En lo que a cinemática se refiere esta máquina consta de la mesa de posicionamiento de dos ejes, del eje vertical proporcionado por la boquilla y dos movimientos angulares supletorios si se deseara, añadiendo el plato giratorio a la mesa.

El espacio para trabajar del que dispone es de 700 mm de ancho, 360 mm de largo y 380 mm de altura.



Ilustración 10. Centro de procesamiento láser “Kondia Aktinos 500”

### 5.2.6. Boquilla (Nozzle)

La boquilla consta de distintas salidas para poder hacer llegar el haz láser, los gases de protección, el gas de arrastre y el polvo a la superficie del material al que deseamos aportar (véase Ilustración 11).

El orificio central se utiliza para que salga el haz láser y el gas de protección central. El gas de protección es primordial para evitar que nada entre por el orificio central, porque si una mota de polvo lograra entrar e hiciese contacto con la lente que hace enfocar al laser hacia un único punto, se podría quemar la lente y quedar inservible. En la zona periférica se sitúa el gas de protección periférica el cual actúa como campana protectora.

Por otra parte, entre el orificio central y la zona periférica se encuentra el lugar por donde sale el polvo junto con el gas de arrastre, la boquilla de aporte. La boquilla trabaja de forma continua y uniforme, es decir, no consta de un número determinado de orificios los cuales expulsan el polvo junto con el gas de arrastre, estos podrían generar un problema de direccionalidad dependiendo de cómo se hagan los aportes.

La interacción del gas de arrastre con el gas de protección central determina la calidad del aporte, es decir, la combinación de ambas decidirá la distribución del polvo en el punto focal de la boquilla.

Desde el punto de vista cinemático, la boquilla de este proyecto está colocada en el eje Z del sistema, el eje vertical, y el centro de procesamiento láser lo desplaza en el eje dependiendo de las necesidades.

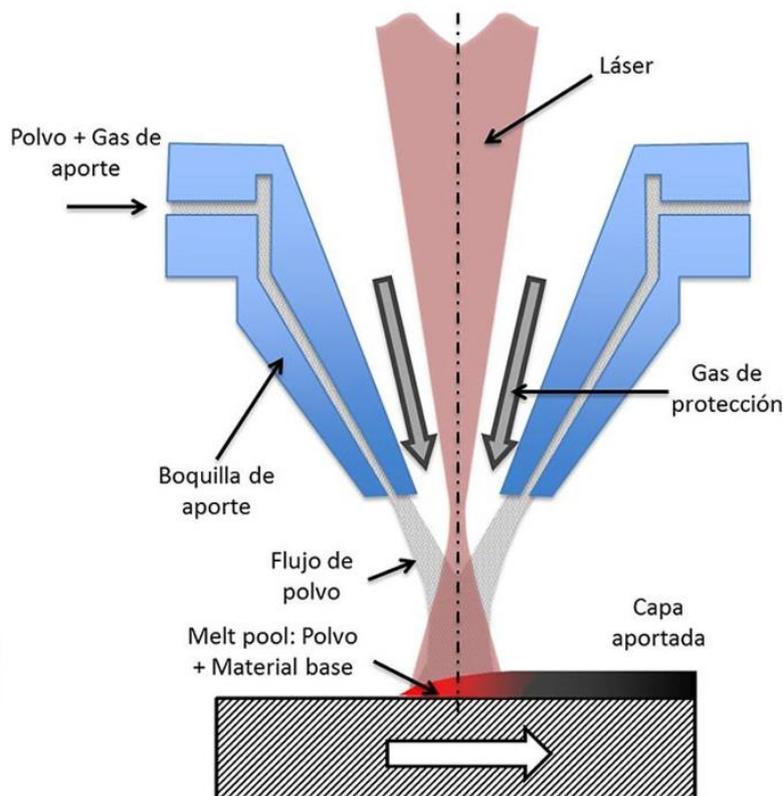


Ilustración 11. Boquilla (Nozzle)

### 5.2.7. Gas

El gas suministrado por Praxair, en botellas de gas comprimido, tendrá dos funciones principales durante el proceso. En un principio el gas sale de la bombona (véase Ilustración 12) hacia el alimentador de polvo para mezclarse con el mismo y dirigirlo a la boquilla de la máquina láser para poder realizar el aporte, en este caso al gas se le denominará como gas de arrastre.

Por otra parte, el gas se utiliza como gas de protección, pero hay dos tipos de gas de protección. El primero, el gas de protección central, el cual protege la lente del láser de cualquier partícula que trate de introducirse en la boquilla y además también protegerá el sustrato en la mayoría de los casos para que no reaccione con el oxígeno, pero también tiene su contrapartida, porque este gas es el que más impacto tiene sobre la superficie y si fuese demasiado rápido podría generar porosidad en el aporte. El segundo, el gas de protección perimetral no es necesario excepto en los casos de que el sustrato se oxide fácilmente con un porcentaje mínimo de oxígeno, como pueda ser el titanio. Este gas actuará como una campana protectora con el fin de evitar de que el oxígeno del aire penetre. El gas de protección se suministra directamente desde la bombona, con lo que se podría usar otro



Ilustración 12. Bombonas de gas

gas inerte distinto al de arrastre para la protección del sustrato, helio para el gas de arrastre y argón para el de protección, teniendo este segundo mayor densidad. Este tipo de combinaciones evitan en parte las turbulencias originadas entre el gas de arrastre y el gas de protección central gracias a la diferencia de densidades de los gases.

Este trabajo se va a centrar en las diferencias que dejarán los tres tipos de gases sobre los sustratos, estos gases serán el Argón puro X2, el Helistar 25 y Helistar 50.

- El Argón puro 2X es el más habitual en este tipo de procesos aditivos por su carácter inerte y por ser más barato que el helio. Tiene una pureza de un 99,998% de argón [7].
- El Helistar 25 una mezcla de gases inertes como son el argón y el helio, su composición es un 75% de argón y un 25% de helio. La empresa garantiza que no superan las cinco partes por millón en oxígeno ni en agua [8].
- El Helistar 50 una mezcla de gases inertes como son el argón y el helio, su composición es un 50% de argón y un 50% de helio. La empresa garantiza que no superan las cinco partes por millón en oxígeno ni en agua [9].

### 5.2.8. Sustrato

El sustrato que se usará es el Inconel 718, una superaleación utilizada en la industria aeroespacial, ingeniería marina o incluso en reactores nucleares.

Esta aleación austenítica de base níquel-cromo-molibdeno (véase Tabla 3) ha sido diseñada para resistir ambientes corrosivos y también muestra una alta resistencia a altas temperaturas, además de unas excepcionales características para ser soldado y evitar agrietamientos [3].

Tabla 3. Composición química (%) común del Inconel 718

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Mn
50-55	17-21	4.75-5.5	2.8-3.3	0.65-1.15	0.2-0.8	<1	<0.35
Si	C	B	Cu	P	S	Fe	
<0.35	<0.08	<0.006	<0.3	<0.015	<0.015	Restante	

Este tipo de materiales son adecuados para entornos extremos sometidos a altas temperaturas o altas presiones como podría ocurrir en la turbina de un avión. Cuando se calienta crea una capa de óxido que pasiva y protege la superficie, además, al mantener su resistencia a altas temperaturas es idóneo para procesos en el que el acero o el aluminio sucumbirían.

La resistencia a alta temperatura se forma por la precipitación de pequeñas cantidades de niobio que se combinan con níquel para crear un compuesto intermetálico  $Ni_3Nb$ .

El Inconel 718 es una aleación difícil de mecanizar y moldear utilizando los métodos tradicionales por su rápido endurecimiento. Esto tiende a deformar la herramienta en pases posteriores, por ello, se suele usar una herramienta dura con un corte agresivo pero lento para minimizar el número de pasadas. Por esa razón, es recomendable usar este tipo de materiales en procesos LMD donde puedes manipular el material sin problemas (véase Ilustración 13).



Ilustración 13. Blisk de Inconel 718

### 5.2.9. Polvo (*Powder*)

Es la materia prima necesaria para cualquier proceso aditivo. Este polvo metálico se deposita en la tolva del alimentador, dentro de la tolva se precalienta para eliminar la posible humedad y se aumenta la presión con el gas de arrastre, es conducido por el gas de arrastre por el disco del alimentador hasta el tubo y de ahí hasta la boquilla. Tras salir de la boquilla junto con el gas de arrastre se termina fundiendo sobre el sustrato al que se trata de aportar gracias al haz láser.

Existe una gran variedad de polvos metálicos como, por ejemplo, el de aluminio. Y no necesariamente han de ser metales puros, sino que también pueden ser aleaciones como el MetcoClad 718 (véase Ilustración 14), el necesario para este proyecto. La composición química del polvo de Inconel 718 utilizada en los ensayos es la que sigue, como podemos observar en la Tabla 4 [6].

Tabla 4. Composición química (%) común del polvo de MetcoCladl 718

Cr	Mo	Nb	Fe
17-21	2.5-3.5	1-2.5	15-21
Si	Mn	Ta	Ni
0.1-0.35	0.1-0.35	1-2.5	50-55

Este compuesto es cancerígeno, se debe tener mucho cuidado en todo momento a la hora de manipular este tipo de materiales e ir siempre extremadamente protegido con guantes y mascarara.

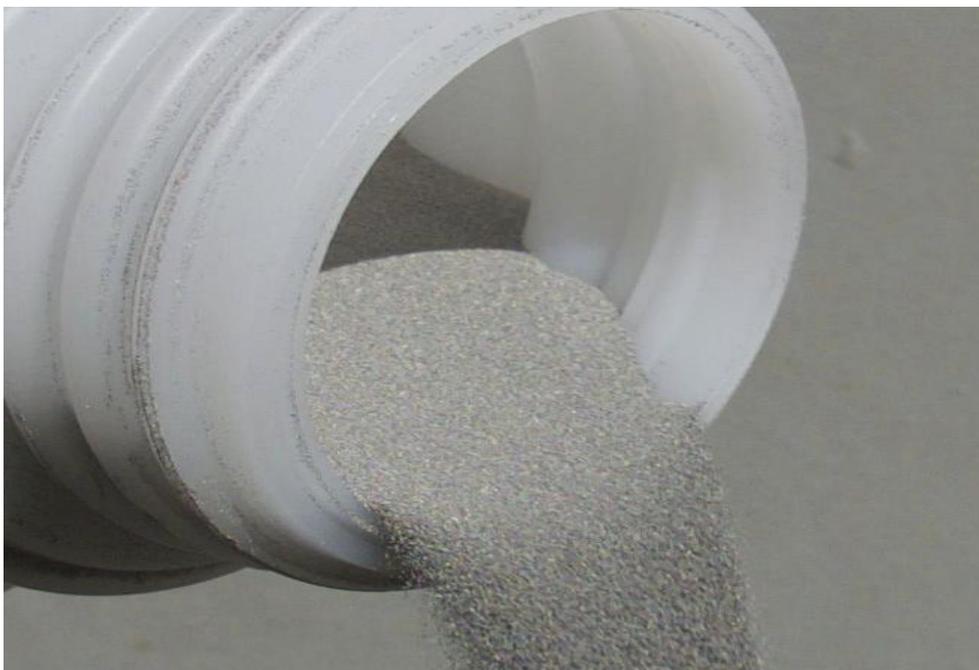


Ilustración 14. Polvo de MetcoClad 718

### 5.2.10. Pirómetro de dos colores

En el proceso que se va a llevar a cabo no es posible utilizar un termopar dadas las altas temperaturas y la naturaleza del proceso. Por consiguiente, se ha decidido utilizar un termómetro con sistema óptico, el pirómetro digital de dos colores con fibra óptica IGAR 12-LO.

Los pirómetros se pueden dividir por el número de bandas espectrales de su sistema de detección. Se pueden clasificar en sistemas únicos, duales o multibanda, que son a su vez pasivos o activos. Los sistemas pasivos constan de un solo receptor y el sistema activo contiene una fuente de radiación que coopera con un receptor. Para el sistema activo, el procedimiento de medición de temperatura tiene dos pasos. Primero, la emisividad del sustrato es determinada y segundo, la temperatura del sustrato se determina en base a la potencia medida de la radiación emitida por el sustrato.

En general, el uso del pirómetro se considera problemático, porque la medición térmica de los pirómetros está vinculada con la emisividad. Para la medición de temperatura precisa, se debe conocer la emisividad del sustrato. Esta estimación de la emisividad es realmente compleja, sobre todo cuando la emisividad varía rápidamente.

En el pirómetro de dos colores del taller, el sistema óptico recoge la energía radiada por la superficie de nuestro sustrato, transforma dicha energía en una señal eléctrica para poder leerla, manipularla y almacenarla mediante el software InfraWin5 del ordenador en un archivo de texto (véase Ilustración 15) el cual contiene tiempos, temperaturas, emisividad y porcentaje de intensidad. Este sistema óptico será primordial ya que en el proceso de LMD no se puede tener un termómetro de contacto sobre la superficie en la zona del aporte para la medición de su temperatura.

El sistema óptico consta de dos termómetros infrarrojos que miden la energía emitida con dos longitudes de onda diferentes. Gracias a estas dos longitudes de onda se obtendrán la emisividad del objeto y la temperatura mediante los algoritmos del software InfraWin5 en el ordenador, puesto que la emisividad no cambia por igual al aumentar la temperatura en distintos materiales.

Estos pirómetros de dos colores se deben tener muy en cuenta en aplicaciones que se necesite una gran precisión a altas temperaturas [4, 5].

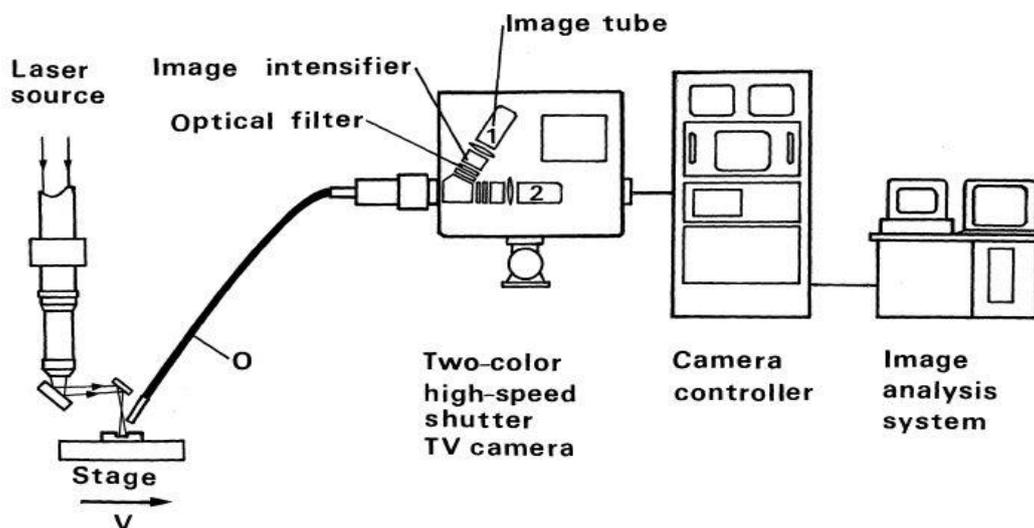


Ilustración 15. Funcionamiento de pirómetro

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA

ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## 6. Metodología

Este proyecto está dirigido a la investigación de las diferencias creadas en los sustratos por distintos gases en los procesos de LMD dada la escasez de información relativo a ello en este campo. Para ello y dar inicio al proyecto, se hace una investigación y recopilación de datos sobre el proceso LMD y sobre los gases en procesos de soldadura, ámbito sobre el que hay muchos estudios realizados.

Se decide utilizar el Inconel 718 por ser un componente no magnético muy común en los procesos aditivos. Las pruebas se realizan en un sustrato de 10 mm de espesor para evitar efectos térmicos indeseados.

Al ser los gases el centro de todo el trabajo, se pone en contacto con Praxair, la empresa suministradora, para la ampliación de conocimiento de los gases que se les propone para este experimento. Tras la reunión en su empresa de Lutzana (véase Ilustración 16) los ensayos se efectúan en el taller del Departamento de Mecánica de alto rendimiento con los gases suministrados por Praxair: Argón X2, Helistar 25 y Helistar 50.



Ilustración 16. Praxair Lutzana

### 6.1. Preparación previa

Antes de empezar con cualquier ensayo lo primero es obtener el sustrato con la calidad superficial deseada para los ensayos que se realizarán y el factor  $k$  de la pendiente de emisividad para poder calibrar el pirómetro de dos colores adecuadamente.

Para el cálculo del factor  $k$  de emisividad, se utiliza un sustrato del mismo material y de parecidas dimensiones y se calienta en el horno hasta 1423 K, posteriormente se mide con un termopar tipo K y se logra el factor del material en cuestión. Ese factor se utilizará más tarde en el pirómetro en los ensayos para calcular la entrada de calor y la curva de enfriamiento y más adelante para el control de temperatura a la hora de realizar los aportes.

Para la obtención de la calidad superficial deseada en el sustrato, se corta la barra de Inconel 718 con la sierra metalográfica (véase Ilustración 17) con disco de caucho para metales especialmente duros.

Posteriormente, se colocan los sustratos en la maquina rectificadora (véase Ilustración 18) para que la muela rectifique la superficie de dichos sustratos. Ya que el Inconel 718 es un material no magnético se utiliza una mordaza magnética para la sujeción del mismo a la maquina rectificadora.

Para finalizar la preparación, se limpia la superficie con alcohol para evitar que queden impurezas sobre la superficie del sustrato.



Ilustración 17. Sierra metálica



Ilustración 18. Rectificadora

## 6.2. Curva de enfriamiento

Se comprueba la curva de enfriamiento sobre el Inconel 718 con los diferentes gases, lo que significa que se analiza la temperatura de la superficie del sustrato durante el calentamiento mediante el láser hasta su posterior enfriamiento.

Para ello se realiza un ensayo sin aporte de ningún tipo, es decir, sin añadir polvo MetcoClad 718.

El ensayo se realiza sobre un punto fijo de la superficie del sustrato con el pirómetro apuntando al centro del spot. Ese punto fijo se calienta durante un segundo con 250W de potencia del láser y se apaga. Este experimento se realiza con tres caudales distintos 5 L/min, 10 L/min y 15 L/min (véase Ilustración 19).

Estos ensayos se repiten tres veces por cada gas para comprobar la repetitividad de los resultados obtenidos.

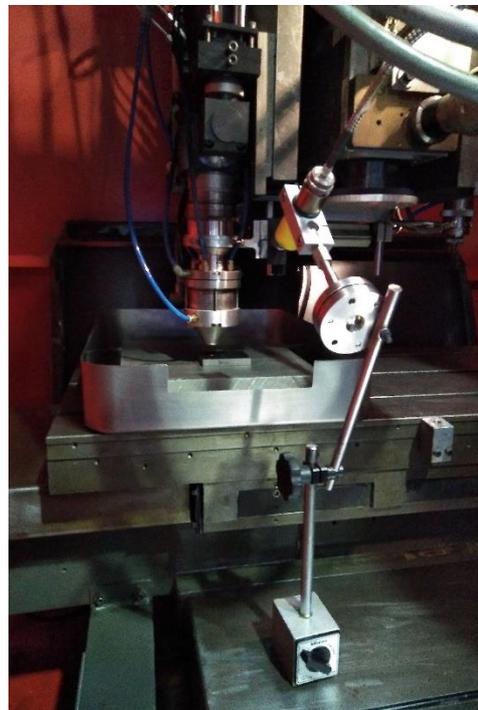


Ilustración 19. Pirómetro y boquilla

### 6.3. Realización de aportes

Para realizar los aportes, se ha programado un recorrido en la que aporta una línea recta de cuatro centímetros y regresa al punto de inicio sin aportar.

Se coloca el sustrato de Inconel 718 en el punto deseado y se da inicio al programa, cuando este acaba se mueve la boquilla medio centímetro en paralelo al aporte y se reinicia el programa. Todo esto se efectúa con el pirómetro apuntando en todo momento al centro del spot (véase Ilustración 20), es decir, fijando el puntero al movimiento de la boquilla.

Se realiza este ensayo a tres potencias distintas (400W, 600W y 800W) y todas ellas con los tres gases, siendo muy importante que se purgue el sistema antes de iniciar el programa con otro gas.

Se corre el programa tres veces con cada potencia de cada gas para comprobar que los resultados de las repeticiones son parecidos.

Todo esto se realiza con la máscara puesta, ya que el polvo del MetcoClad 718 es cancerígeno.

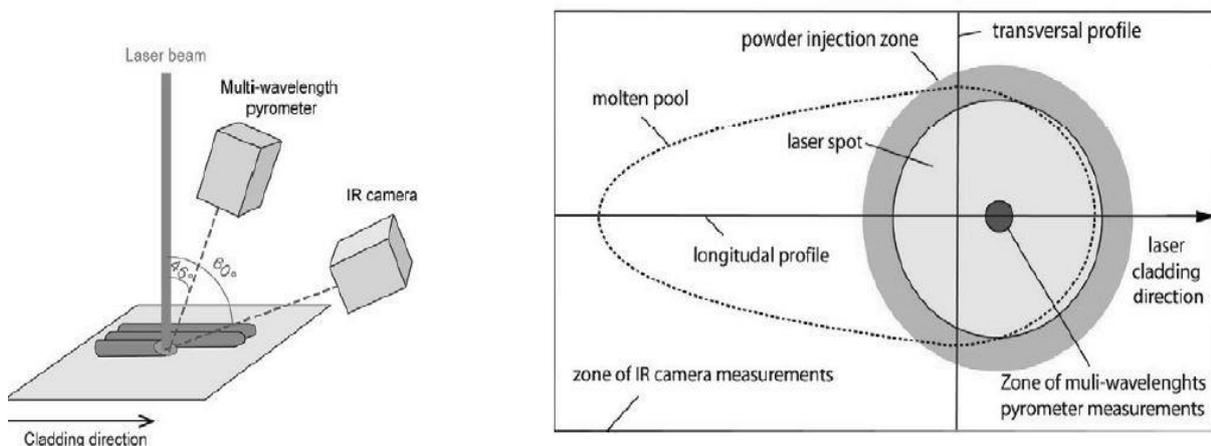


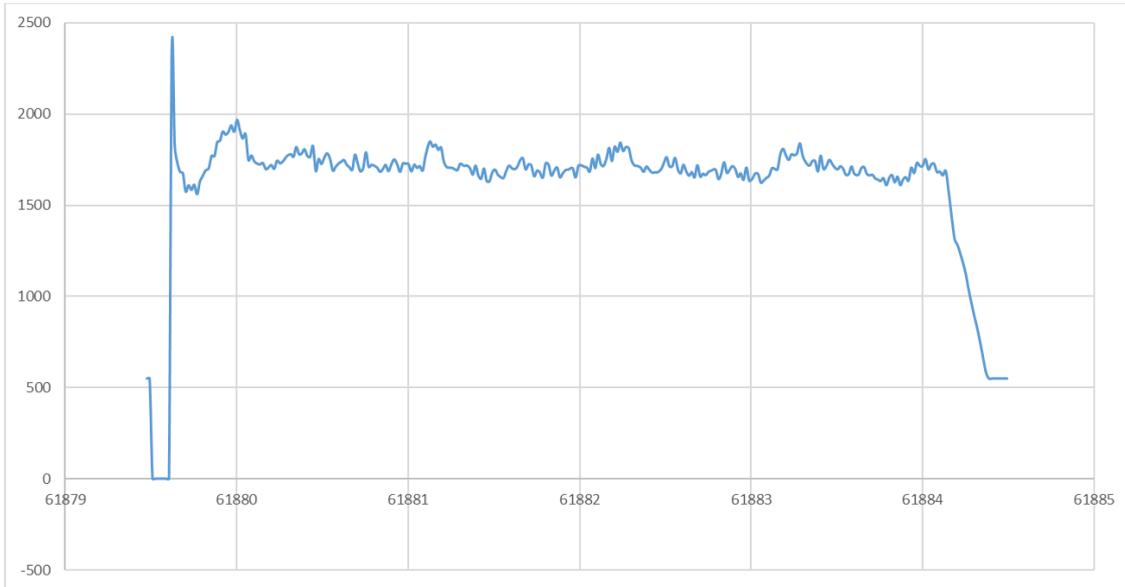
Ilustración 20. Utilización del pirómetro

### 6.4. Obtención de gráficos de temperaturas

Los datos logrados por el pirómetro son almacenados en archivos de texto por el programa InfraWin5. Para poder analizar esos datos, es necesario convertir esos datos a gráficos y para ello se ha utilizado el programa Excel.

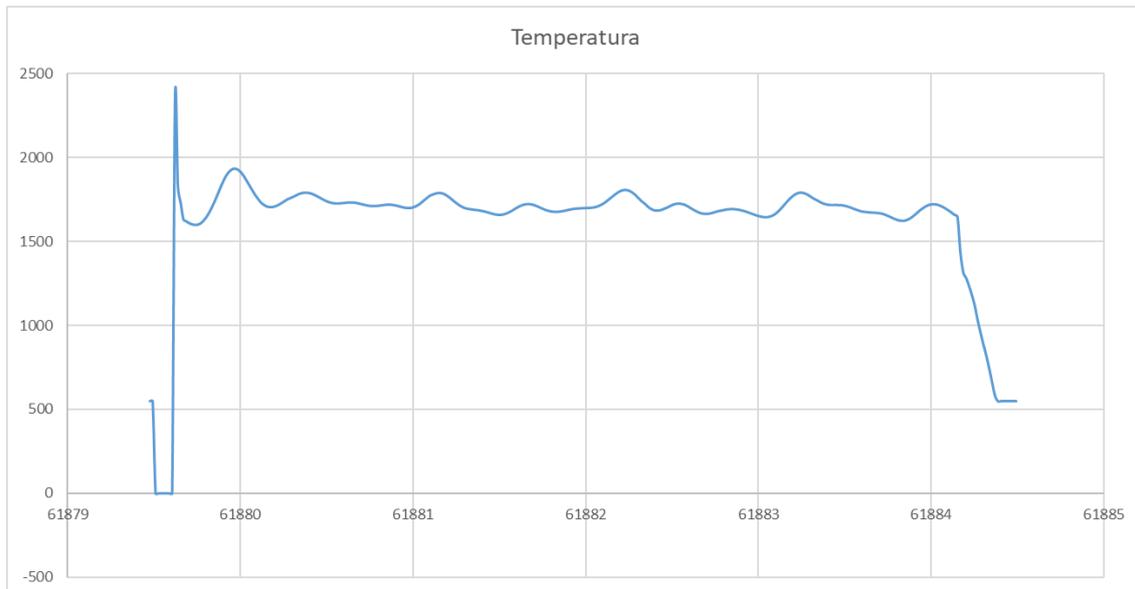
Pero, al analizar las gráficas se ha comprobado que la señal contiene excesivo ruido (véase Gráfica 1), siendo muy difícil sacar conclusiones sólidas y eso planteaba un problema.

Gráfica 1. Señal sin filtrar



Como solución de ese problema se decide programar un script mediante Matlab para que filtre en parte el ruido y quede una gráfica más lineal. Este programa recibe un archivo de texto con los datos originales y devuelve otro archivo de texto con los datos filtrados como puede apreciarse en la Gráfica 2 (para más información ver Anexo 12.3. Filtrado de datos Matlab).

Gráfica 2. Señal filtrada



Este nuevo archivo de texto se introduce en Excel y se obtienen las gráficas de la curva de enfriamiento para poder analizarla y sacar conclusiones aproximadas sobre lo que pueda pasar en la microestructura del Inconel 718 durante el proceso del aporte.

## 6.5. Creación de probetas

Una vez habiendo terminado los aportes, se procede al corte de las mismas. El corte se hace en perpendicular (véase Ilustración 21) con la sierra metalográfica para poder determinar posteriormente la anchura del cordón o la profundidad del mismo.

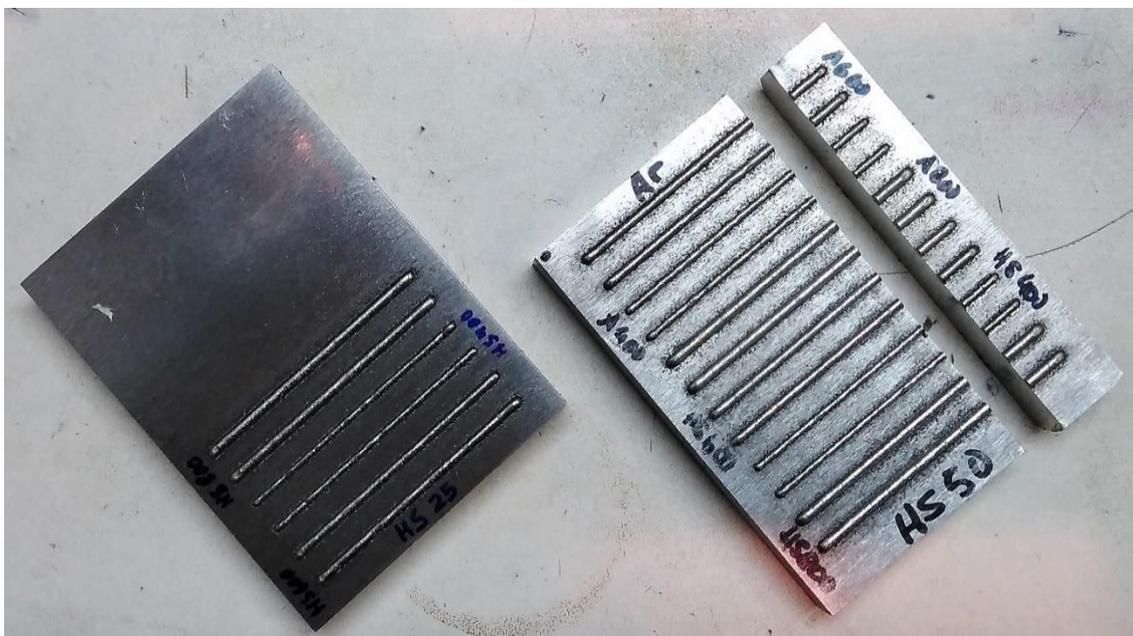


Ilustración 21. Sustratos de Inconel 718

Tras haber cortado los sustratos, se procede a encapsularlos mediante una máquina que comprime y calienta la pieza junto con cuarenta mililitros de resina para enfriarlos posteriormente y dejar la probeta lista para lijar y pulir.

Para lijar estas probetas se usa una pulidora metalográfica manual con cuatro lijas metálicas de diamante distintas, lijas con granos FEPA de 80, 220, 600 y 1200 (véase Ilustración 22).

Para pulir en cambio, se utilizan paños de 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  con sus respectivos aerosoles de diamantes en la misma pulidora metalúrgica.

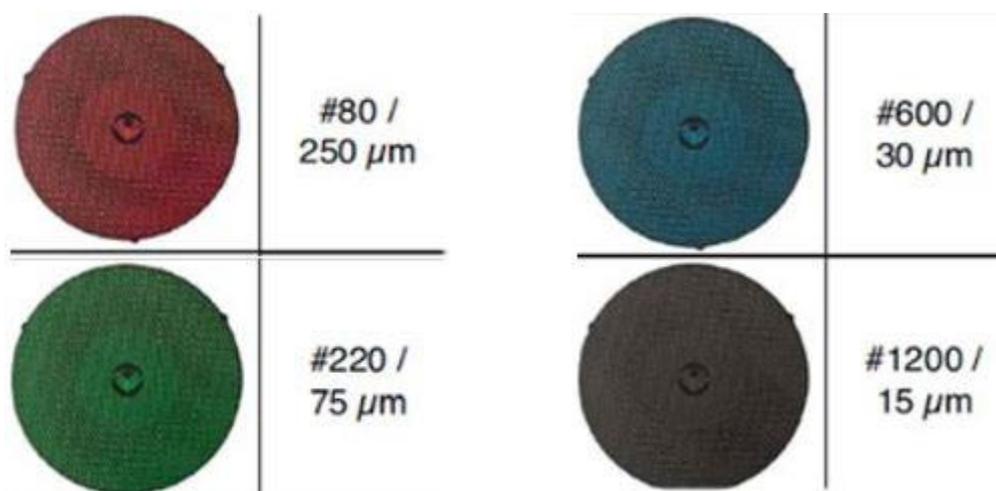


Ilustración 22. Lijas de pulidora metalúrgica

Después de dejar la superficie de la probeta como un espejo y antes de que el Inconel 718 se pasive, es decir antes de que cree una capa protectora en la superficie, se ataca químicamente con el reactivo Kalling's 2 para que en su posterior análisis en el microscopio sea más sencilla la distinción entre el aporte y el sustrato.

Este último paso se realiza con mascarera, gafas protectoras y guantes de goma para evitar cualquier contacto o inhalación del reactivo.

## 6.6. Microscopía

Para finalizar con la recopilación de datos para el proyecto, se sacan unas fotos a la sección del aporte con el "Microscopio confocal Leica DCM 3D" y se generan archivos PDF para poder medir posteriormente con el AutoCAD tanto la anchura del cordón, como la profundidad de dilución, el ángulo húmedo, la altura del cordón o incluso la porosidad (véase Ilustración 23).

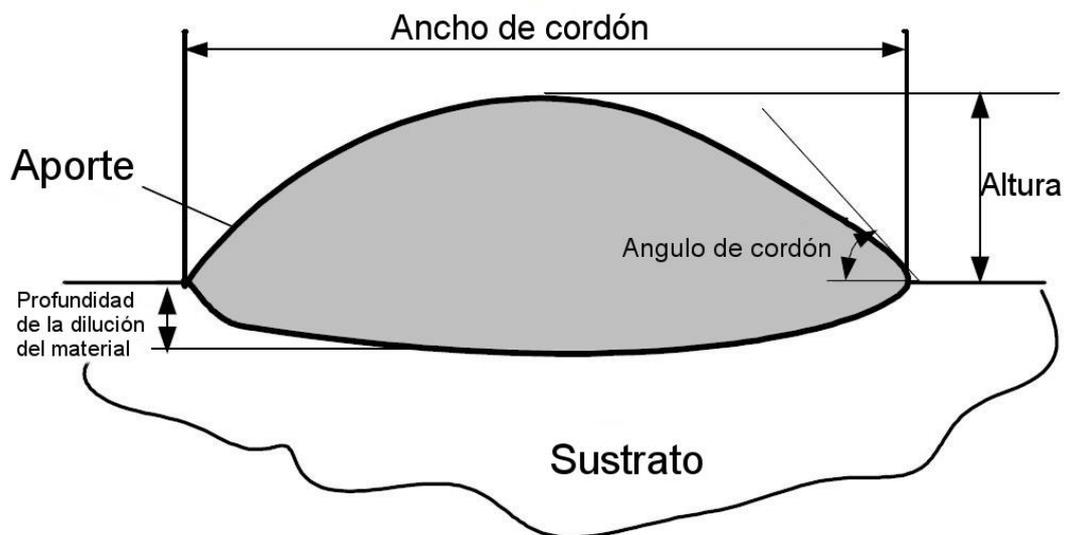


Ilustración 23. Características del aporte

Tras conseguir todos estos datos se meten en una tabla Excel para su posterior comparación y extracción de conclusiones.

## 7. Resultados

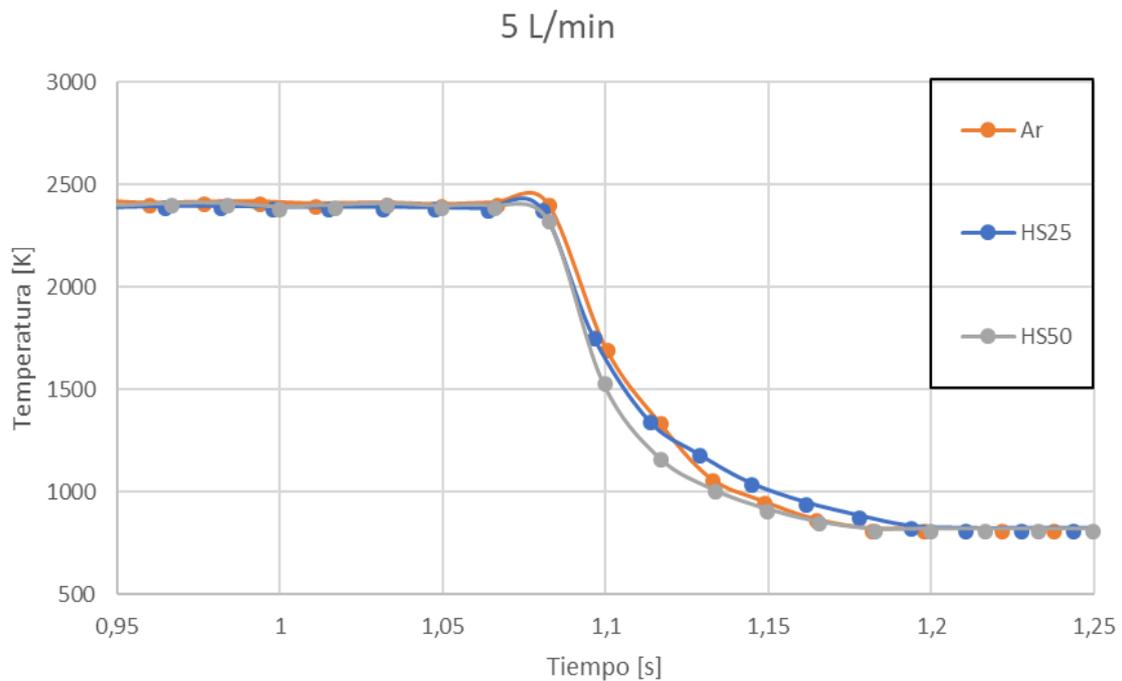
### 7.1. Análisis de la curva de enfriamiento

A lo largo de estas pruebas, se analizó la influencia de diferentes mezclas de gases a una potencia láser de 250 W con tres caudales distintos: 5 L/min, 10 L/min, 15 L/min. Los gráficos que vienen a continuación representan las temperaturas alcanzadas por los distintos caudales de los tres gases a analizar.

#### 7.1.1. Ensayos con 5 L/min de caudal de gas

Los resultados obtenidos por el pirómetro los primeros 0.7 segundos son realmente inestables en los tres gases, esto se debe al brusco cambio de temperatura en la superficie el cual crea un efecto que engaña al sensor del pirómetro. Por esa razón se determina que el láser estará encendido durante un segundo, hasta estabilizarse la señal del pirómetro.

Gráfica 3. Ensayo de curva de enfriamiento, caudal 5 L/min



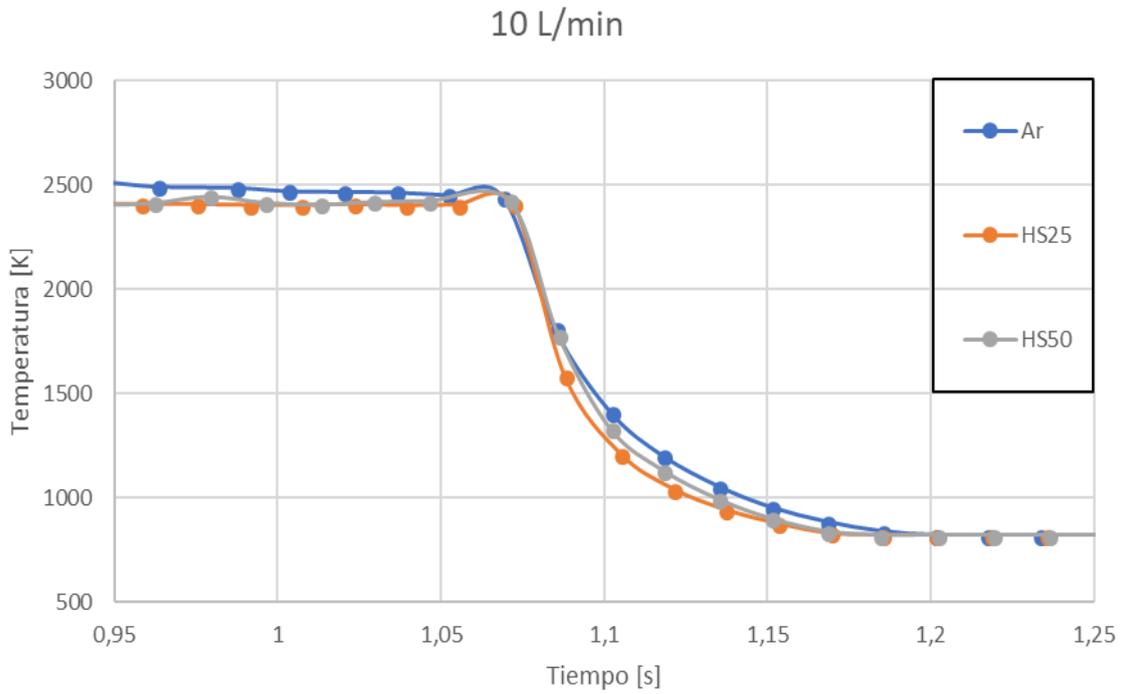
Como se ve en la Gráfica 3 la temperatura más baja que puede registrar el pirómetro es de 822 K, pero registra intensidad de señal hasta los 373 K, el cual se ha medido previamente con el termopar.

Tras ese segundo la señal ya es estable y todos los gases rondan los 2420 K de temperatura y aproximadamente tardan 0.2 segundos en bajar de los 373 K, sin aparentes diferencias entre ellos.

### 7.1.2. Ensayos con 10 L/min de caudal de gas

Tal como en el anterior ensayo, los primeros 0.7 segundos los datos recogidos por el pirómetro son inestables e incoherentes, por lo que se analizará a partir de la señal estable.

Gráfica 4. Ensayo de curva de enfriamiento, caudal 10 L/min

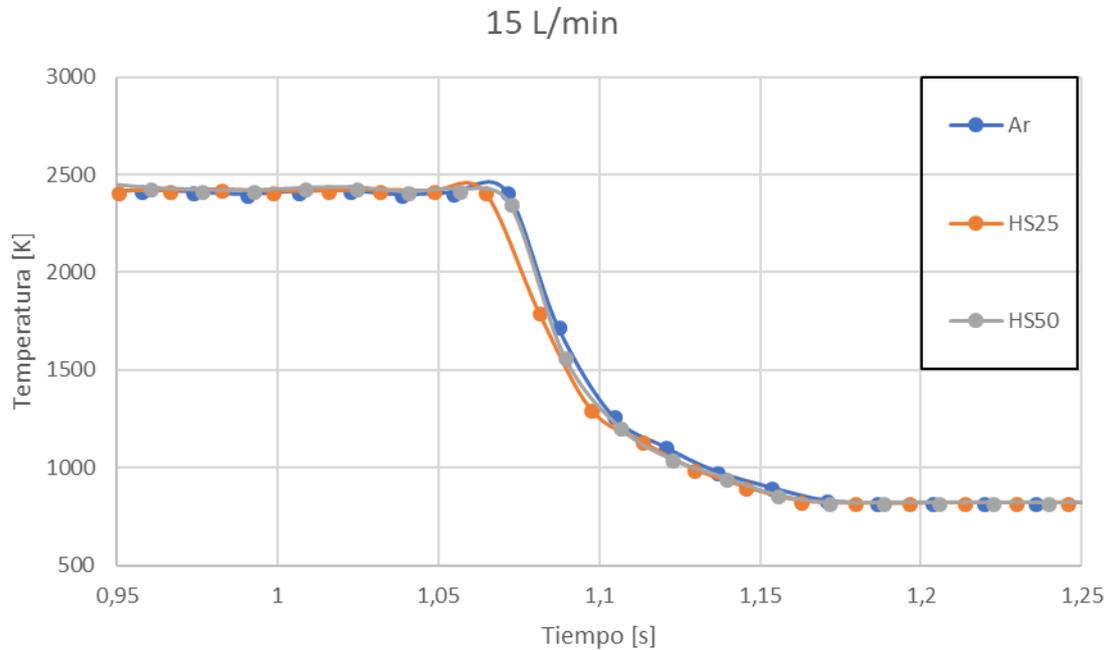


Como se observa en la Gráfica 4 no hay cambios aparentes respecto al ensayo anterior. Los tres gases rondan los 2420 K al pasar un segundo y logran bajar de los 373 K al de 0.2 segundos.

### 7.1.3. Ensayos con 15 L/min de caudal de gas

Al igual que los anteriores dos ensayos se analizará a partir de estabilizarse la señal.

Gráfica 5. Ensayo de curva de enfriamiento, caudal 15 L/min



Al analizar la Gráfica 5 se ve que no hay cambios aparentes en los diferentes caudales con los distintos gases a una potencia láser tan baja como es la de 250 W.

## 7.2. Análisis metalográfico de los aportes

En estos ensayos, serán evaluadas las diferencias de los tres gases en los procesos LMD a tres potencias distintas: 400 W, 600 W y 800 W. En las próximas ilustraciones se podrá observar la geometría de la sección de los aportes y en la posterior tabla la media de las tres repeticiones de las características del aporte.

### 7.2.1. Ensayos con 400 W de potencia

Tal y como se puede ver en la Ilustración 24, la profundidad de dilución y la altura del aporte decrecen a medida que la cantidad de helio crece.

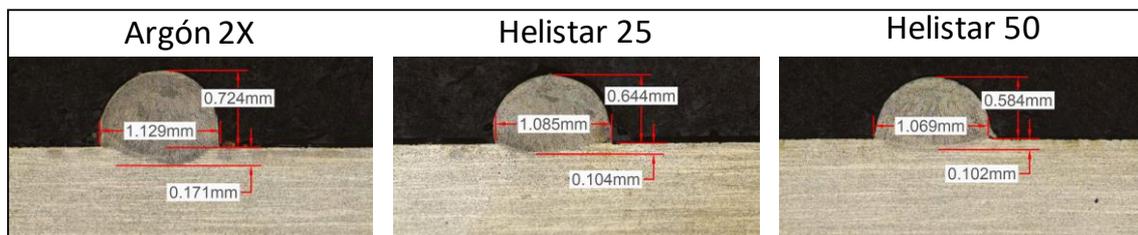


Ilustración 24. Sección de aportes a 400 W de potencia láser

En la Ilustración 25 se ve como el ángulo húmedo se mantiene parecido con el Argón 2X y el Helistar 25, pero, decrece diez grados con el Helistar 50.

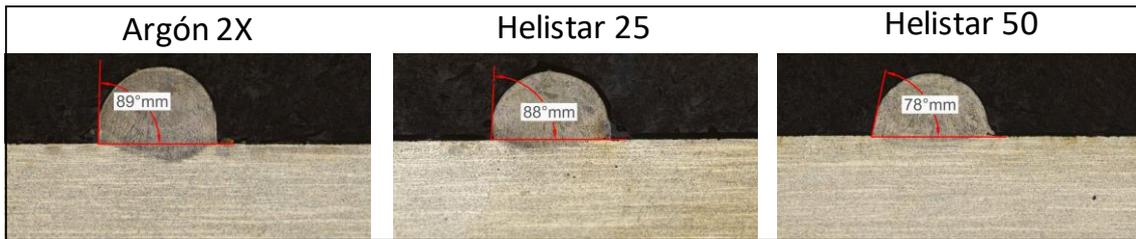


Ilustración 25. Ángulos húmedos de los aportes a 400 W de potencia láser

La razón de que los ángulos húmedos sean tan grandes, es la gran cantidad de polvo aportado para la pequeña potencia láser que se ha utilizado. Los ángulos húmedos no suelen ser aceptables a partir de 65°, pero buscamos diferencias entre los gases y no el aporte perfecto.

Los ensayos se han realizado tres veces por cada gas, y la media de las repeticiones de las características de los aportes viene dada en la Tabla 5.

Tabla 5. Ensayos de aporte a 400 W de potencia láser

Gas	Altura [mm]	Ancho [mm]	Profundidad de dilución [mm]	Ángulo húmedo [°]
Argón 2X	0.69	1.15	0.16	89
Helistar 25	0.63	1.10	0.13	88
Helistar 50	0.60	1.06	0.10	78

### 7.2.2. Ensayos con 600 W de potencia

En la Ilustración 26 podemos ver como el ancho del cordón aumenta con los tres gases al haber aumentado la potencia del láser. Tal y como pasaba en el anterior ensayo no hay grandes diferencias en anchura y profundidad de dilución, pero, sí que existe una mayor diferencia en la altura entre el ensayo con el Helistar 50 y las otras dos.

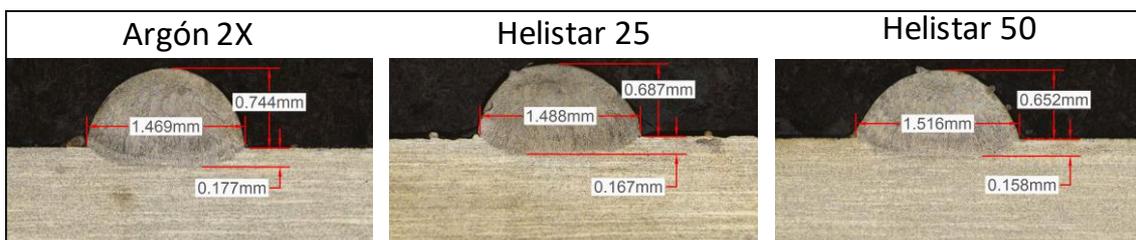


Ilustración 26. Sección de aportes a 600 W de potencia láser

En lo que a los ángulos húmedos se refiere, en la Ilustración 27 se puede apreciar como decrece a medida que el helio aumenta.

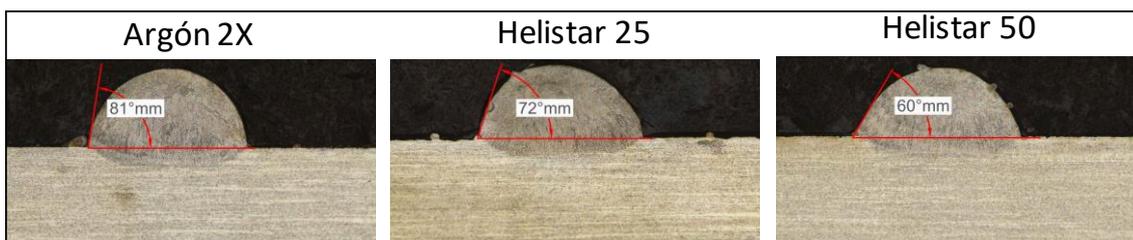


Ilustración 27. Ángulos húmedos de los aportes a 600 W de potencia láser

En la Tabla 6 donde se ven las medias de las repeticiones se puede apreciar que no hay diferencias significativas en altura, ancho o profundidad de dilución, pero si, sin embargo, en los ángulos húmedos.

Tabla 6. Ensayos de aporte a 600 W de potencia láser

Gas	Altura [mm]	Ancho [mm]	Profundidad de dilución [mm]	Ángulo húmedo [°]
Argón 2X	0.75	1.48	0.18	81
Helistar 25	0.70	1.49	0.17	73
Helistar 50	0.66	1.51	0.15	60

### 7.2.3. Ensayos con 800 W de potencia

Los resultados de los ensayos a 800 W de potencia láser son visibles en la Ilustración 28. Como en los anteriores ensayos la altura varía más que la anchura y la profundidad de dilución entre los cordones de los distintos gases.

El ancho y la dilución en este último ensayo han crecido notablemente gracias al incremento de la potencia láser.

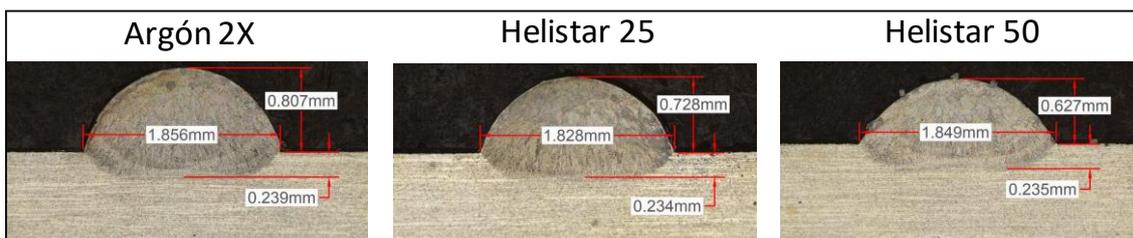


Ilustración 28. Sección de aportes a 800 W de potencia láser

El aumento de la potencia láser también logra una reducción del ángulo húmedo. Además, se puede apreciar la diferencia de este ángulo entre los distintos gases (véase Ilustración 29).

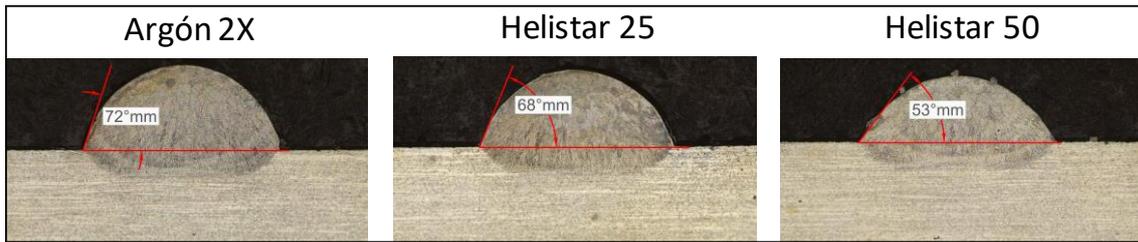


Ilustración 29. Ángulos húmedos de los aportes a 800 W de potencia láser

Siguiendo el mismo procedimiento, podemos observar la media de las repeticiones en la Tabla 7 a continuación.

Tabla 7. Ensayos de aporte a 800 W de potencia láser

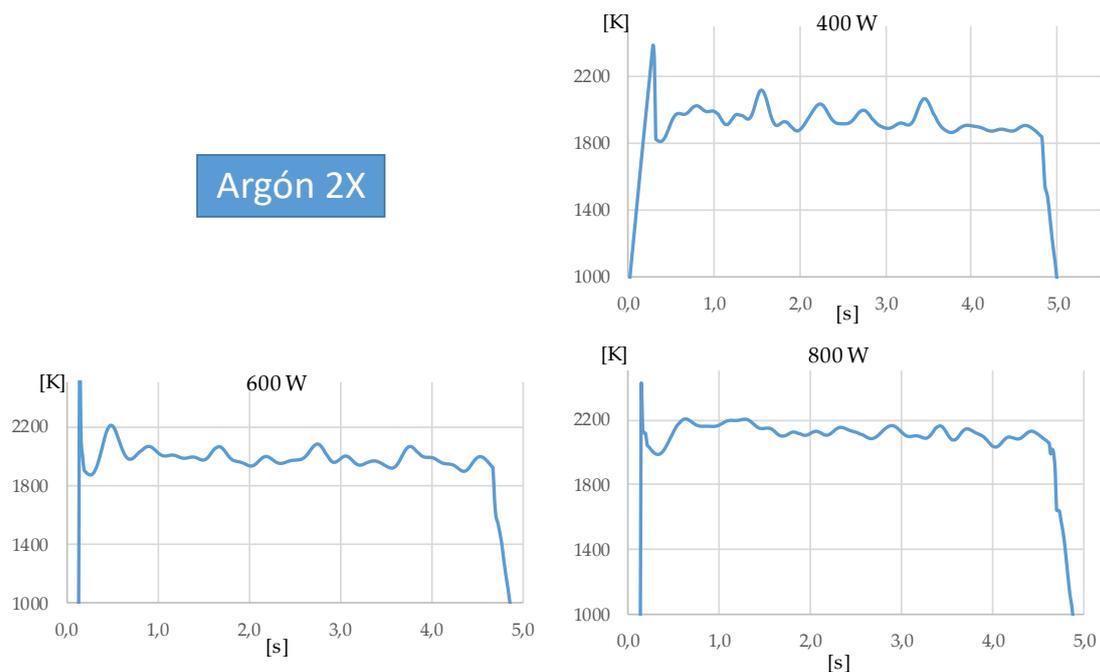
Gas	Altura [mm]	Ancho [mm]	Profundidad de dilución [mm]	Ángulo húmedo [°]
Argón 2X	0.79	1.87	0.25	73
Helistar 25	0.73	1.82	0.26	67
Helistar 50	0.65	1.84	0.23	53

### 7.3. Análisis pirométricos de los aportes

En el momento de los aportes, también se registraron las temperaturas mediante el pirómetro de dos colores durante todo el proceso.

Al utilizar Argón 2X, las temperaturas medias obtenidas a las potencias de 400 W, 600 W y 800 W son 1938 K, 1991 K y 2121 K respectivamente (véase Gráfica 6). Es decir, al aumentar la potencia se eleva la temperatura.

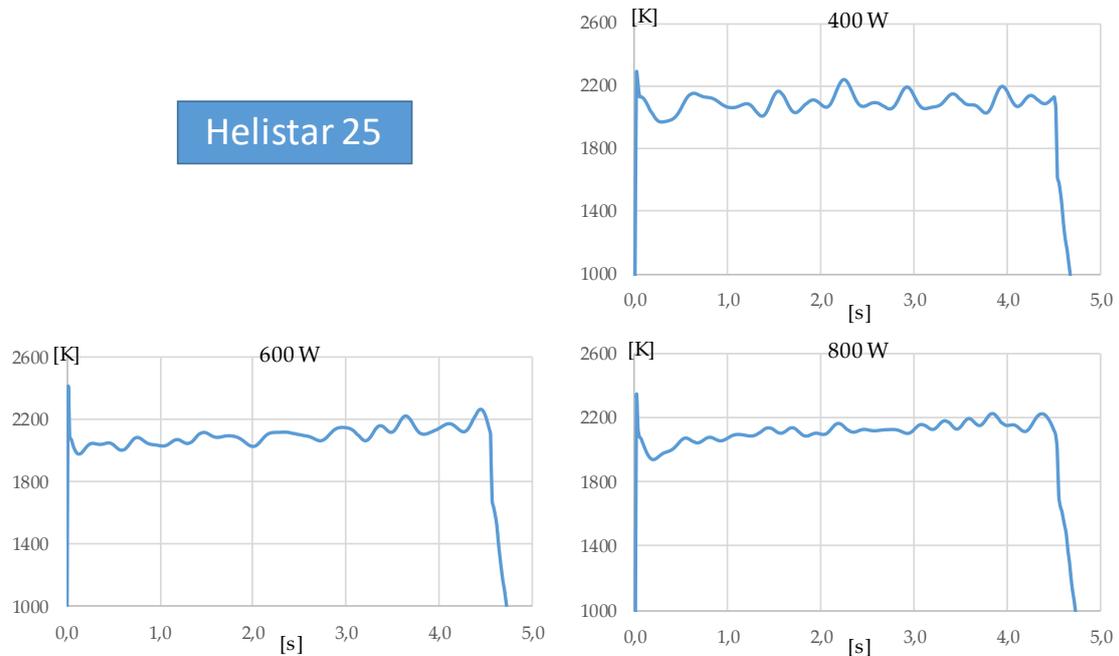
Gráfica 6. Aportes con Argón 2X



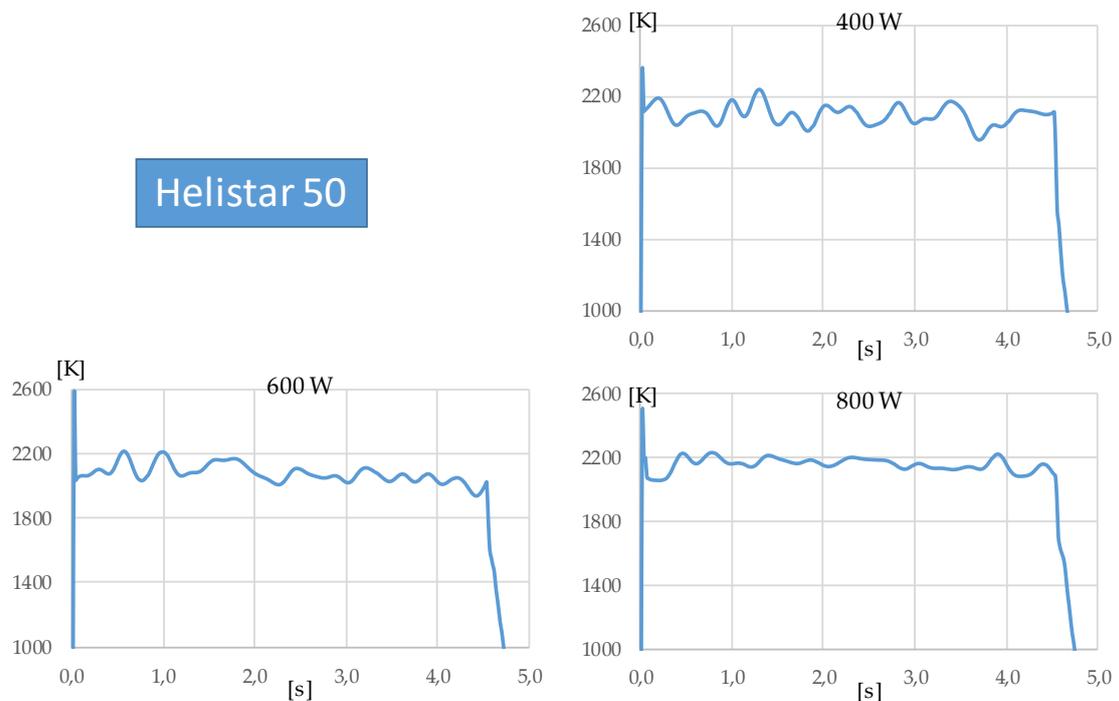
En todos los casos donde se ha utilizado el helio las temperaturas han sido superiores a los ensayos con argón puro. Sin embargo, el incremento de la potencia no suponía un aumento de la temperatura a tener en cuenta.

La temperatura media de los ensayos de Helistar 25 a distintas potencias ha sido de 2093 K y la de los ensayos con Helistar 50 de 2097 K (véanse Gráfica 7 y Gráfica 8).

Gráfica 7. Aportes con Helistar 25



Gráfica 8. Aporte con Helistar 50



eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA

ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## 8. Descripción de tareas. Diagrama Gantt

### 8.1. Descripción de tareas

A lo largo del desarrollo de esta investigación se llevan a cabo una serie de tareas para la ejecución del proyecto. En el período que ha durado este trabajo, se han anotado las fechas importantes (al inicio o al final de los distintos apartados) como se puede observar en el diagrama Gantt.

El diagrama Gantt de la planificación se halla disponible al final de este apartado.

La evolución del proyecto es la siguiente:

#### 8.1.1. Documentación sobre el tema

Antes de comenzar con el trabajo, el primer paso a dar es informarse del proceso LMD, de los materiales sobre los que se va a aportar, de la influencia y características de los gases en los procesos de soldadura por láser y de documentos científicos sobre variaciones en los procesos LMD.

Para ello, se necesita documentación referente al estudio (documentos científicos sacados de Internet, libros sobre el tema o reuniones con empresas interesadas en la investigación).

#### 8.1.2. Planificación del proyecto

Se toman las decisiones sobre que material y que mezcla de gases se emplearán para la investigación en base a la documentación previa y el aprovisionamiento de las materias primas necesarias. Además, se decide que estudios realizar en los experimentos.

#### 8.1.3. Preparación de los experimentos

Antes de comenzar con los ensayos, es necesaria la puesta a punto del material a utilizar; ya sea la instalación del pirómetro o elementos no habituales en el sistema láser, como, cortar y rectificar el sustrato para obtener la superficie deseada en los experimentos.

#### 8.1.4. Ensayos experimentales

En un principio, se realizan las pruebas previas a los aportes previstas en la planificación del proyecto, es decir, el cálculo de la curva de enfriamiento.

Posteriormente, se ejecutan los aportes con el cálculo de temperaturas de los mismos.

Finalmente, se corta, encapsula, lija y pule la probeta para poder analizarla mediante el microscopio confocal Leica.

### **8.1.5. Recopilación y procesamiento de datos**

Se recoge toda la información de temperaturas y se pasa a tablas y gráficas para poder estudiarla.

Se recopilan todos los datos sobre la geometría de las secciones de los aportes y se pasan a las tablas para su posterior evaluación.

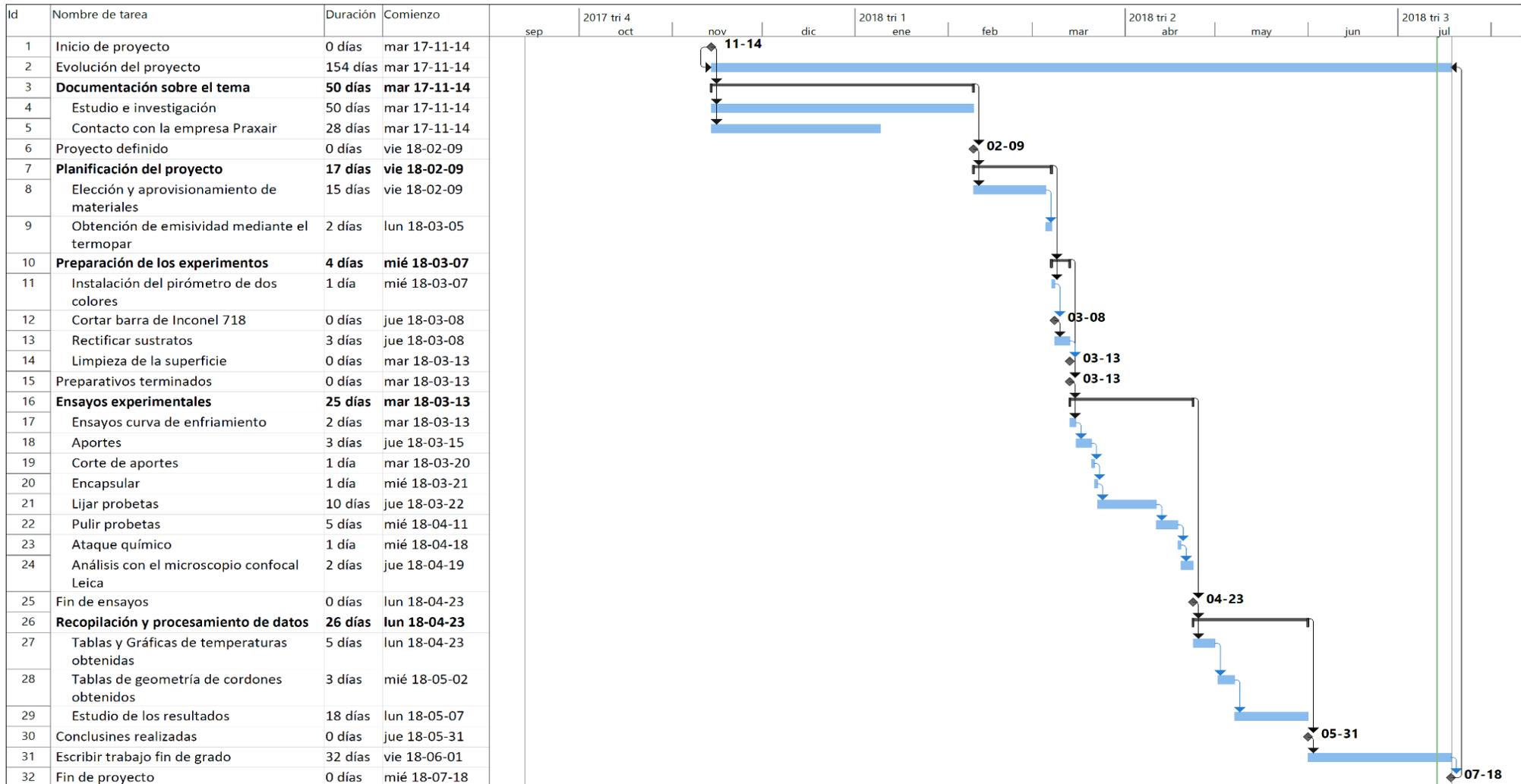
Para terminar, se procesan los datos y redactan conclusiones en base a los conocimientos adquiridos.

### **8.1.6. Escribir el trabajo fin de grado**

En este último paso, se documenta todo el trabajo realizado durante la investigación “Evaluación de la influencia del tipo de gas en los procesos de aporte por láser”, dejando de forma clara y concisa los resultados y conclusiones.



## 8.2. Diagrama Gantt



Proyecto: Proyecto1 Fecha: sáb 18-07-14	Tarea		Resumen del proyecto		Tarea manual		solo el comienzo		Fecha límite	
	División		Tarea inactiva		solo duración		solo fin		Progreso	
	Hito		Hito inactivo		Informe de resumen manual		Tareas externas		Progreso manual	
	Resumen		Resumen inactivo		Resumen manual		Hito externo			



## 9. Presupuesto

A continuación, se detallan los costes que se presupuestaron para esta investigación.

### Recursos humanos

Tabla 8. Costes de recursos humanos

Horas internas	Salario	Tiempo	Total
Ingeniero senior	45 €/h	50 h	2.250 €
Ingeniero industrial en practicas	20 €/h	300 h	6.000 €
Técnico de taller	25 €/h	70 h	1.750 €
			10.000 €

<b>Total recursos humanos</b>	10.000 €
-------------------------------	----------

### Recursos materiales

- Amortizaciones

Tabla 9. Costes de amortizaciones

Máquina herramienta	Coste	Tiempo	Vida útil	Valor residual	Total
Centro láser	328.000 €	12 h	6 año(s)	1.300 €	340,25 €
Pirómetro IGAR 12-LO	8.000 €	12 h	4 año(s)	50 €	12,42 €
Pulidora	5.000 €	100 h	10 año(s)	0 €	26,04 €
Rectificadora	47.000 €	15 h	10 año(s)	100 €	36,64 €
Encapsuladora	9.000 €	9 h	6 año(s)	50 €	6,99 €
Sierra metalográfica	10.000 €	9 h	7 año(s)	50 €	6,66 €
Microscopio Leica	230.000 €	20 h	5 año(s)	700 €	477,71 €
					907 €

Equipo Informático	Coste	Tiempo	Vida útil	Valor residual	Total
Portátil Packard Bell	600 €	200 h	4 año(s)	40 €	14,58 €
Torre de ordenador HP	1.000 €	150 h	5 año(s)	50 €	14,84 €
Licencia Microsoft Office	150 €	200 h	1 año(s)	---	15,63 €
Licencia Nx	2.000 €	50 h	1 año(s)	---	390,63 €
Licencia Leica	2.000 €	20 h	1 año(s)	---	46,88 €
					483 €

- Gastos

Tabla 10. Costes de gastos

Material de oficina	Coste	Total
Papelería	50 €	50 €
Fotocopias	70 €	70 €
		120 €

Materiales	Coste	Total
Barras de Inconel 718	500 €	500 €
Polvo MetcoClad 718	500 €	500 €
Disco de corte de caucho	100 €	100 €
Lijas de diamante	200 €	200 €
Paños de base metálica	100 €	100 €
Spray de diamantes	90 €	90 €
Argón 2X	300 €	300 €
Helistar 25	380 €	380 €
Helistar 50	380 €	380 €
Resina para encapsular	50 €	50 €
Kalling´s 2	50 €	50 €
		2.650 €

<b>Total recursos materiales</b>	<b>4.159 €</b>
----------------------------------	----------------

Tabla 11. Presupuesto final

<b>Subtotal</b>	14.159 €
<b>Costes indirectos (15%)</b>	2.124 €
<b>Coste directo e indirecto</b>	16.283 €
<b>Imprevistos 5%</b>	814 €
<b>IVA 21%</b>	3.590 €
<b>Total</b>	20.688 €

Para este proyecto se ha tenido en cuenta el trabajo de dos ingenieros y un técnico para el cálculo de horas internas, cuyo coste total es de 10.000 € (véase Tabla 8).

Respecto a los recursos materiales se han tenido en cuenta por una parte las máquinas del taller y el equipo informático, las cuales se amortizan un poco con el pequeño uso que se les da, y por otra parte los gastos de materiales, ya sean para el taller o la oficina. El coste de los recursos materiales es de 4.159 € (véanse Tabla 9 y Tabla 10).

Para los costes indirectos se ha tenido en cuenta gastos como la de la luz general como un 10% de los gastos directos. Para los imprevistos que puedan suceder a lo largo de la evolución de proyecto se ha calculado un 5% de los gastos directos e indirectos (véase Tabla 11).

En el cálculo del IVA se han tomado en cuenta los imprevistos y los costes directos e indirectos. Con lo que finalmente se obtiene el presupuesto final de todo el proyecto, un coste total de 20.688 €.

## 10. Análisis de riesgos

La realización de los experimentos de esta investigación conlleva ciertos riesgos, conocerlas de antemano es clave para la prevención de estos problemas.

### 10.1. Análisis de riesgo de objetivos

En lo referente a los objetivos y resultados de la investigación, se corre riesgo de no lograr el efecto deseado con dicha investigación o incluso no obtener diferencia alguna. Con lo cual, la inversión dirigida a este proyecto no obtendría el resultado deseado.

Por otra parte, existe riesgo de no haber seleccionado adecuadamente los gases. El hecho de elegir unos gases más comunes para la industria en favor de la aplicación práctica en ese sector, podría hacer que no se elijan los gases adecuados para la investigación y hacer que no se cumplan los objetivos.

También hay riesgo de no encontrar diferencias entre los distintos gases en el análisis comparativo, esto ocurre si los análisis efectuados son incompletos; por ejemplo, de no ser los análisis con el microscopio confocal Leica suficientes y necesitase un estudio más a fondo con rayos X o con una tomografía o con un análisis destructivo de grano incluso para poder obtener los resultados precisos para la investigación.

Riesgo	Impacto	Probabilidad	Acción correctora
No obtener diferencia alguna entre las distintas mezclas de gases	2	4	Redirigir el estudio y realizar otro tipo de ensayos
Mala elección de los gases a investigar	4	3	Mayor estudio previo de gases en otros procesos
Análisis realizados insuficientes	5	2	Realizar más análisis para corroborar resultados

### 10.2. Análisis de riesgo en máquinas y prevención

En lo que a las máquinas respecta, los riesgos pueden ser daños materiales o peligro para la salud. Por lo tanto, todas las máquinas llevan sus propias medidas de seguridad para evitar cualquier mal.

El generador láser puede sobrecalentarse o enviar más potencia de la debida convirtiéndose en peligroso, por ello, está conectado a un sistema de refrigeración. Si este sistema de refrigeración no estuviese conectado el generador no funcionaría por seguridad.

El centro de procesamiento láser podría llegar a romper la boquilla por mal funcionamiento de su movimiento cinético. Por otra parte, por seguridad del personal, mientras a máquina está en funcionamiento la puerta a de estar siempre cerrada y no se puede abrir hasta que la maquina esté parada. Esto mismo pasa con la sierra metalográfica o en la rectificadora, donde la pieza puede saltar.

El alimentador de polvo puede contaminar la pieza final si su sistema no estuviese bien limpiado y hubiese una mezcla de polvos. Por otro lado, el alimentador podría tener alguna fuga y expulsar polvo y gas.

El microscopio confocal Leica también podría tener un fallo en su movimiento cinético a la hora de manipularlo e incrustar la lente rompiéndola contra la probeta.

Tabla 12. Análisis de riesgo en la maquinaria del proceso

Máquina	Calificación de riesgo	Probabilidad	Prevención
Generador láser	5	1	✓
Centro de procesamiento	3	3	✓
Sierra metalográfica	1	2	✓
Rectificadora	2	3	✓
Alimentador de polvo	1	3	
Microscopio Leica	1	2	✓

Como se puede ver en la Tabla 12, las máquinas se han calificado del 1 al 5 dependiendo de los riesgos que contienen para la salud y los daños materiales que puedan ocasionar, siendo 1 muy poco riesgo y 5 un riesgo crítico. Y lo mismo con el rango de probabilidad, 1 poco probable y 5 muy probable.

### 10.3. Análisis de riesgo de los materiales y su prevención

En lo que a las materias primas respecta, pueden generar daños críticos para la salud de las personas, por ese motivo es prioritaria la prevención en estos casos.

El polvo MetcoClad 718 utilizado para los experimentos de este proyecto es cancerígeno si se inhala o ingiere. Por ello, a la hora de manipular este material hay que tener sumo cuidado, además de tener guantes de látex y mascarilla puestos en todo momento.

El ataque químico se realiza con el compuesto Kalling's 2, el cual es corrosivo para la piel, tóxico si se inhala o ingiere y puede llegar a marear o dar dolor de cabeza si su vapor entra en contacto con los ojos durante periodos prolongados. Por esa razón, a la hora de manipular el reactivo es necesario llevar los guantes de látex, mascarilla y gafas protectoras puestas.

Todas las mezclas de gases utilizadas para esta investigación llevan gran cantidad de argón, una fuga de este gas en un recinto cerrado podría provocar asfixia. Por otra parte, el contacto prolongado con este gas en el tiempo también puede provocar efectos de esterilidad.

Tabla 13. Análisis de riesgo de las materias primas

Materias primas	Calificación de riesgo	Probabilidad	Prevención
Polvo MetcoClad 718	5	2	✓
Kalling's 2	5	2	✓
Argón 2X	1	1	
Helistar 25	1	1	
Helistar 50	1	1	

Como en la Tabla 13 podemos observar, las materias primas han sido evaluadas del 1 al 5 tal como en el análisis de riesgo de la maquinaria del proceso.

## 11. Discusión y conclusiones

### 11.1. Discusión

Como se ha podido comprobar en los resultados obtenidos, la geometría de los aportes y la temperatura del proceso están fuertemente influenciadas por la adición de helio a los procesos aditivos basados en argón.

Hay ciertas características geométricas que apenas cambian con los diferentes gases en el proceso, como son el ancho de cordón y la profundidad de dilución. Estas diferencias no exceden los 30  $\mu\text{m}$  para la dilución y 50  $\mu\text{m}$  para el ancho, son muy parecidas con todos los gases y no se aprecia una tendencia clara. El único cambio que sufren estos parámetros es al variar la potencia del láser, que ambos dos crecen al aumentar dicha potencia.

La altura del cordón y el ángulo húmedo, sin embargo, muestran claros cambios con el aumento de helio en las mezclas. Al comparar la altura del cordón entre el argón puro y el Helistar 50, habrá una diferencia de 70  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  y 140  $\mu\text{m}$  en las potencias láser de 400 W, 600 W y 800 W respectivamente. Por otra parte, la altura del cordón del aporte del Helistar 25 en las distintas potencias está siempre entre las alturas de los dos anteriores gases.

El ángulo húmedo es el parámetro que mayor variación tiene con el incremento del helio. La diferencia de ángulo va aumentando entre los distintos gases a medida que se incrementa la potencia del láser, y esto hace que la geometría del cordón cambie significativamente. En 800 W de potencia láser el ángulo húmedo da su máxima diferencia entre el argón puro y el Helistar 50, 21 grados de diferencia.

Dejando a un lado la geometría del cordón, la temperatura del baño de fusión es un parámetro al que le afecta en gran medida la mezcla de gas que utilizemos. Al usar argón puro la diferencia de temperatura obtenida entre los 400 W y 800 W de potencia llega a ser de 200 K. Sin embargo, el proceso con argón puro en ningún momento alcanza la temperatura a la que se llega en los procesos con mezclas de helio, pero estas, no tienen grandes diferencias entre si con el aumento de potencia del láser. Apenas suben 20 K entre los 400 W y 800 W de potencia.

En el estudio de la sección del cordón, se ha podido verificar que la porosidad no aumenta ni disminuye dependiendo de la concentración de helio que tenga la mezcla de gas que se utilice a la hora de aportar, y esto corrobora que la porosidad depende mayormente de la cantidad de material aportado en relación con el caudal de gas de protección que se esté empleando.

## 11.2. Conclusiones

Este trabajo fin de grado evalúa la influencia del tipo de gas en los procesos LMD. Se estudian tres mezclas de gases distintos con las siguientes composiciones químicas: Ar 99.998%, Ar 75%-He 25% y Ar 50%-He 50%.

Respecto al análisis de temperatura, la presencia del helio afecta en gran medida a la temperatura del baño fundido aumentando su temperatura.

En cuanto a las características geométricas, existe una diferencia apreciable de hasta 140  $\mu\text{m}$  en la altura del cordón. El aumento de helio decrece la altura del cordón. Pero no hay grandes diferencias en el ancho ni en su profundidad de dilución, un máximo de 50  $\mu\text{m}$ .

El ángulo húmedo es una de las propiedades que más varía dependiendo de la mezcla de gas que se utilice para el proceso, presenta una diferencia de 21 grados entre el argón puro y la mezcla con un 50% de helio a 800 W de potencia. El aumentar la concentración de helio hace más pequeños los ángulos húmedos.

Por lo tanto, ha de tenerse en consideración la concentración de helio en argón que se utilice a la hora de aportar en los procesos LMD, puesto que los efectos que originan sobre el sustrato son distintos a pesar de ser ambos gases inertes.

## 12. Referencias

- [1] Toyerskani, E.; Khajepour, A.; Corbin, S. *Laser Cladding*, 1ª ed.; CRP Press LLC: Boca Raton, Florida 33431, 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] Megamex. (s.f.). Inconel aleación 718, aleación de níquel 718. Recuperado 7 febrero, 2018, de <http://megamex.com/span/inconel-718.html>
- [4] Pavlov, M.; Novichenko, D.; Doubenskaia, M. Optical Diagnostics of Deposition of Metal Matrix Composites by Laser Cladding. *Phys. Procedia* 2011, 12, 674-682
- [5] Purtonen, T.; Kalliosaari, A.; Salminen, A. Monitoring and adaptive control of laser processes. *Phys. Procedia* 2014, 56, 1218-1231
- [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] Praxair Helistar 25 Product Data Sheet; Praxair, Inc.: Danbury, USA, 2018
- [9] Praxair Helistar 50 Product Data Sheet; Praxair, Inc.: Danbury, USA, 2018
- [10] Oerlikon Metco. MetcoClad 718 Material Product Data Sheet; Oerlikon Metco: Pfäffikon, Switzerland, 2018.
- [11] Rofin Laser Macro. *Catálogo Serie FL*; ROFIN-SINAR Laser GmbH; Hamburgo, Alemania, 2011

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA

ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## 13. Anexos

### 13.1. Helistar 25 Data Sheet

#### Especificaciones de producto



Ciente	UPV.ES.INGENIEROS(DPO.ING.MEC.P-LMD)
Producto	Helistar 25
Código	GHL25
Revisión	1
Nº ONU	1956
Nº Ficha de datos de seguridad	300-10-13
Tipo de grifo	C (*)
Ojiva	Verde intenso
Franja	(**)
Cuerpo	Negro
Características del producto	Helio 25% Argón 75%
Especificaciones garantizadas	23-27 % He < 5 ppm O2 < 5 ppm H2O
Notas	
Observaciones	Utilizar Argón Q1 (GARQ1) y Helio Q1 (GHEQ1) (*) Grifo de Presión Positiva (**) Lleva la palabra STARGAS en el cuerpo.

## 13.2. Helistar 50 Data Sheet

### Especificaciones de producto



Ciente	UPV.ES.INGENIEROS(DPO.ING.MEC.P-LMD)
Producto	Helistar 50
Código	GHL50
Revisión	4
Nº ONU	1956
Nº Ficha de datos de seguridad	300-10-01A
Tipo de grifo	C (*)
Ojiva	Verde Intenso
Franja	-
Cuerpo	Negro
Características del producto	Helio 50% Argón 50%
Especificaciones garantizadas	45 - 55 % He < 5 ppm O2 < 5 ppm H2O
Notas	
Observaciones	(*) Grifo de presión positiva 1. Identificación de gas acorde UNE EN ISO 14175: I3 - ArHe- 50

### 13.3. Filtrado de datos Matlab

El script utilizado para el filtrado de datos viene detallado a continuación.

```

if op2==8 %Filtrado de datos txt
    clc;
    clear iniX iniY iniXa iniXb iniXaa iniXbb mediX mediY mediXa mediXb medi;
    for contgrafi=1:numfo
        clc;
        deci=1;
        delete (figure(1));clf;
        figure(1);
        plot(S_ini(:,1),S_ini(:,contgrafi+1),'Color','b');
        hold on; grid on;
        fprintf(['Desea aplicar el filtro en\nel grafico ',num2str(contgrafi),'?(Esc
        riba 1=SI,2=NO)']);
        confirm=input(': ');
        if confirm==1
            while deci==1
                Y=fft(S_ini(:,contgrafi+1));
                luze=length(S_ini(:,1));
                valizoom=10;
                absampli=abs(Y)/((luze/2)-1);
                ampli=Y/((luze/2)-1);
                axiymax=max(absampli)/valizoom;
                axiymmin=- (0.01)*max(absampli)/valizoom;
                axixmax=luze;
                axixmin=0;
                axipers=[axixmin,axixmax,axiymmin,axiymax];
                frec=[S_ini(:,1)*Frecuencia];
                delete (figure(1));clf;
                figure(1);
                stem (frec,absampli,'.m','markersize',3,'linewidth',1);
                hold on; grid on; xlabel('Frecuencias'); ylabel('Amplitudes'); axis(axi
                pers);
                clc;
                numfilt=input('En cuantos tramos desea aplicar el filtro?: ');
                for contfilt=1:numfilt
                    clc;
                    clear S_resa S_resb S_absa S_absb xlin1 ylin1 xlin2 mediX medi;
                    if contfilt==1
                        opzoom=1;
                        while opzoom~=3
                            clc;
                            delete (figure(1))
                            figure(1);
                            stem (frec, absampli,'.m','markersize',3,'linewidth',1);
                            hold on; grid on;xlabel('Frecuencias'); ylabel('Amplitudes'); ax
                            is(axipers);
                            fprintf('Ahora tendra que seleccionar unos puntos en el grafico.\n
                            n')
                            opzoom=input('Que desea hacer?(1=Ampliar,2=Reducir,3=Continuar):'
                            );
                            if opzoom==3
                                clc;
                                delete (figure(1))
                                figure(1);
                                stem (frec, absampli,'.m','markersize',3,'linewidth',1);
                                hold on; grid on;xlabel('Frecuencias'); ylabel('Amplitudes');
                                axis(axipers);
                            else
  
```



```
fprintf('\nIntroduzca el indicador de reduccion.\n\nPor ejemplo  
: si ha elegido reducir introduzca "10" para hacer\n')  
fprintf('que la grafica sea 10 veces menor,\nno introduzca "10",  
si ha elegido ampliar,\n')  
fprintf('para ver la grafica 10 veces mas grande\n\n')  
zom=input('Introduzca aqui el numero: ');  
if opzoom==1  
    valizoom=valizoom*zom;  
elseif opzoom==2  
    valizoom=valizoom/zom;  
end  
axiymax=max(absampli)/valizoom;  
axiymin=-(0.01)*max(absampli)/valizoom;  
axipers=[axixmin,axixmax,axiymin,axiymax];
```

```
end  
end  
else  
    delete(line1);  
    delete(line2);  
end  
clc;  
fprintf('Utilice el boton izquierdo del raton para seleccionar\nnios  
puntos en el grafico de izquierda a derecha.\n');  
fprintf('\nSeleccione los dos puntos entre los cuales\nse encuentran  
los datos que desea filtrar');  
fprintf('\n\nCuando lo haga, apareceran los puntos elegidos para la  
correccion');  
fprintf('\n\nPara poder continuar debera pulsar la tecla ENTER\nno ha  
cer CLICK sobre el grafico');  
[iniX(:,contgrafi),iniY(:,contgrafi)]=ginput(2);  
xlin1=[iniX(1,contgrafi) iniX(1,contgrafi)];  
ylin=[-(0.01)*max(absampli)/valizoom,max(absampli)/valizoom];  
xlin2=[iniX(2,contgrafi),iniX(2,contgrafi)];  
xlin3=[iniX(1,contgrafi),iniX(2,contgrafi)];  
ylin2=[0,0];  
line1=line(xlin1,ylin,'Color','r','linewidth',2);  
line2=line(xlin2,ylin,'Color','r','linewidth',2);  
line3(contfilt)=line(xlin3,ylin2,'Color','r','linewidth',5);  
hold on;  
waitforbuttonpress();  
S_resa=S_ini(:,1)-((iniX(1,contgrafi))/Frecuencia);  
S_absa=abs(S_resa);  
S_resb=S_ini(:,1)-((iniX(2,contgrafi))/Frecuencia);  
S_absb=abs(S_resb);  
[iniXa(1,contgrafi),dergrafa]=find(S_absa(:,1)==min(S_absa(:,1)));  
[iniXb(1,contgrafi),dergrafb]=find(S_absb(:,1)==min(S_absb(:,1)));  
a=iniXa(1,contgrafi);  
b=iniXb(1,contgrafi);  
Y(a:b)=0;  
waitforbuttonpress();  
end  
z=real(iff(Y));  
delete(figure(1));clf;  
figure(1);  
subplot(2,1,1);plot(S_ini(:,1),S_ini(:,contgrafi+1),'Color','b');  
hold on; grid on; title('Original');  
subplot(2,1,2);plot(S_ini(:,1),z,'Color','b');  
hold on; grid on; title('Filtrada');  
clc;  
fprintf('Desea sobrescribir los datos filtrados\nsobre los originales?(  
1=SI,2=NO)')
```



```
confi=input(': ');
if confi==2
    deci=input('Desea reiniciar el filtrado de esta grafica?(1=SI,2=NO): ');
elseif confi==1
    S_ini(:,contgrafi+1)=z;
    deci=2;
end
end
else
end
end
end
```