

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

INTEGRACIÓN DE SENSORES EN PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA DE PIEZAS METÁLICAS

Alumno/Alumna: Ruiz-Bravo, Arribas, Sonia

Director/Directora: Lamikiz, Menbaka, Aitzol

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 22, Julio, 2019

Datos básicos del Trabajo Fin de Grado

- *Título:* Integración de sensores en procesos de fabricación aditiva de piezas metálicas.
- Alumna: Ruiz-Bravo Arribas, Sonia
- Director: Lamikiz Mentxaka, Aitzol
- Universidad: Escuela de Ingeniería de Bilbao
- Departamento: Ingeniería Mecánica

Resumen trilingüe

- **Resumen:** El estudio se va a centrar en el aporte por láser, también conocido como Laser Cladding, el cual utiliza el láser como fuente de calor para depositar una capa delgada de metal sobre un sustrato en movimiento. En el actual mercado despierta un gran interés gracias a que facilita la fabricación de piezas metálicas con geometrías complejas, la reparación de piezas de alto valor añadido y los recubrimientos superficiales. Si bien el aporte por láser ofrece claramente una serie de ventajas sobre las tecnologías de fabricación convencionales, el proceso también puede tener algunos inconvenientes. Debido a las perturbaciones en el proceso, la calidad del aporte puede variar significativamente haciendo de él un proceso inestable. Con objeto de optimizar el proceso se va a recurrir a sensores de medición, más en concreto de temperatura. Los valores de medida obtenidos a tiempo real permitirán tener un control sobre uno de los parámetros más relevantes que intervienen en el proceso, la potencia del láser. Este hecho será posible gracias al desarrollo de un sistema de control cerrado que se encargará de su regulación.

Palabras clave: *Laser Cladding*, sensores, soporte, temperatura.

- **Abstract:** The study will be focus on Laser Metal Deposition process, also known as Laser Cladding, which uses the laser as a heat source to deposit a thin layer of metal on a moving substrate. In the current market it arouses great interest thanks to the fact that it facilitates the manufacture of metal parts with complex geometries, the repair of pieces of high added value and surface coatings. Although Laser Metal Deposition clearly offers an amount of advantages over conventional manufacturing technologies, the process can also have some drawbacks. Due to the perturbations in the process, the quality of the contribution can vary significantly making it an unstable process. In order to optimize the process, measurement sensors will be used, more specifically of temperature. The measured values obtained in real time will allow the control over one of the most relevant parameters involved in the process, the laser power. This fact will be possible thanks to the development of a closed control system that will be in charge of its adjustments.

Key words: *Laser Cladding*, sensors, support, temperature.

Laburpena: Azterketa fabrikazio gehigarriaren arloan zentratuko da, *Laser Cladding* izenez ere ezaguna, prozesu honek laserra bero-iturri gisa erabiltzen du substratu mugikor batean metalezko geruza fin bat uzteko. Egungo merkatuan interes handia pizten du geometria konplexuak dituzten pieza metalikoak fabrikatzea, balio erantsi handiko piezak eta gainazal estaldurak konpontzea errazten dituelako. Naiz eta fabrikazio gehigarriak hainbat abantaila eskaini teknologia konbentzionalen aldean, prozesuak desabantailak izan ditzake. Prozesuan zehar azaldutako perturbazioak direla-eta, gehiketaren kalitatea asko alda daiteke prozesu ezegonkorra bihurtuz. Optimizatzeko neurri-sentsoreak erabiliko dira, zehazki tenperaturakoak. Denbora errealean lortutako neurriek, prozesuaren parametro garrantzitsuenetako bat kontrolatzea ahalbidetuko dute, hau da, laserraren potentzia. Hori kontrol itxiko sistemaren garapenari esker posible izango da, bere erregulazioaz arduratuko dena.

Hitz gakoak: *Laser Cladding*, sensoreak, euskarri, tenperatura.

Índice

MEMORIA	8
1. Introducción.....	8
2. Contexto.....	9
3. Objetivos y alcance del trabajo.....	12
4. Beneficios que aporta el trabajo.....	13
5. Análisis del estado del arte	14
5.1 Laser Cladding	14
5.2 Pirómetro	18
6. Análisis de Riesgos	21
METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	22
7. Equipo y material empleado	22
8. Optimización de la medida de temperatura	24
8.1 Diseño y montaje del soporte para la óptica del pirómetro.....	25
8.2 Diseño y fabricación de la pieza de unión entre soporte y máquina.....	26
8.3 Ensayo de validación de las medidas del pirómetro.....	28
8.4 Control potencia	30
9. Resultados.....	31
10. Diagrama de Gantt	34
11. Presupuesto	37
CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	39
BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXOS	41
Anexo I: Datos técnicos del pirómetro	41
Anexo II: Piezas soporte del sistema óptico del pirómetro	44
Anexo III: Pieza de unión entre soporte y máquina.....	49

Índice de ilustraciones y tablas

Ilustraciones:

Ilustración 1. Taller del departamento mecánico	11
Ilustración 2. Laser Cladding de dos etapas	14
Ilustración 3. Boquilla lateral	15
Ilustración 4. Boquillas coaxial discreta	15
Ilustración 5. Boquillas coaxia	15
Ilustración 6. Proceso de reparación por Laser Cladding de un alabe de compresor.....	16
Ilustración 7. Parámetros de entrada, proceso y salida en <i>Laser Cladding</i>	17
Ilustración 8. Espectro electromagnético	18
Ilustración 9. Estructura de un pirómetro de dos colores	20
Ilustración 10. Matriz probabilidad impacto	21
Ilustración 11. Esquema posicionamiento láser	25
Ilustración 12. Soporte óptica pirómetro	25
Ilustración 13. Mecanizado piezas soporte	26
Ilustración 14. Pieza superior parte de arriba.....	26
Ilustración 15. Pieza superior parte de abajo	26
Ilustración 16. Pieza inferior	27
Ilustración 17. Soporte antes	27
Ilustración 18. Soporte después.....	27
Ilustración 19. Taladrado útil.....	28
Ilustración 20. Roscado útil.....	28
Ilustración 21. Rectificado útil	28
Ilustración 22. Corte chapa por electroerosión	28
Ilustración 23. <i>Set up</i> del ensayo	29
Ilustración 24. Ensayo verificación buen funcionamiento	30
Ilustración 25. Intensidad pirómetro	31
Ilustración 26. Temperatura pirómetro	31
Ilustración 27. Temperatura termopar fino.....	32
Ilustración 28. Temperatura termopar grueso	32
Ilustración 29. Puntos medidos en el voladizo	33
Ilustración 30. Toma de datos microscopio leica	33
Ilustración 31. Deformada voladizo	33

Tablas:

Tabla 1. Comparativa entre pirómetro y Termopares	19
Tabla 1. Horas internas	37
Tabla 2. Amortizaciones.....	37
Tabla 3. Gastos.....	38
Tabla 4. Resumen.....	38

Acrónimos:

LMD: *Laser Metal Deposition*

CAD: *Computer-Aided Design*

MEMORIA

1. Introducción

Mediante este documento se pretende estudiar la optimización del proceso de *Laser Metal Deposition* (LMD) o Aporte por Láser mediante la utilización de sensores de medición, más en concreto de temperatura. Los valores de medida obtenidos a tiempo real permitirán tener un control sobre uno de los parámetros más relevantes que intervienen en el proceso, la potencia del láser. Este hecho será posible gracias al desarrollo de un sistema de control cerrado que se encargará de su regulación.

En primer lugar, se presenta el contexto con objeto de describir la situación en la que se desarrolla el proyecto, junto con las razones que justifican su realización. A continuación, se determinan los objetivos y el alcance, en el que se presenta y detalla el fin último del estudio. Posteriormente, se dedican unas líneas a los beneficios que se podrán obtener gracias a la realización del proyecto y sus resultados.

Seguidamente, en el estado del arte se describe en que consiste el Aporte por Láser y se presentan los posibles sensores de temperatura a emplear. Tras lo cual, se profundiza en el pirómetro de dos colores, el cual se empleará para tomar las mediciones. Asimismo, se presenta la importancia de la existencia de un sistema de control en el proceso a causa de su inestabilidad, al igual que un análisis de los posibles riesgos que supongan un obstáculo para su consecución.

A continuación, se hace referencia a la metodología seguida para la introducción del pirómetro de dos colores en la máquina, al igual que el desarrollo de la programación del sistema de control de ciclo cerrado.

Posteriormente, se incluye una descripción de las tareas e hitos a cumplir para llevar un control del avance del proyecto. Asimismo, se adjunta un presupuesto que estima los costes de su realización.

Por último, se incluyen las conclusiones extraídas a partir de los ensayos realizados en el taller y posibles acciones futuras que realizar para continuar con la mejora del proceso.

Al final del documento se incorporan anexos con objeto de proporcionar todos los datos necesarios.

2. Contexto

La Fabricación Aditiva (FA) consiste en la unión de materiales para hacer objetos a partir de modelos 3D, generalmente capa por capa, en oposición a metodologías de fabricación tradicionales basadas en la sustracción.

La Fabricación Aditiva tuvo su origen en el Prototipado Rápido, cuyo objetivo final era la creación de un prototipo físico a partir de un CAD 3D, pero que rara vez cumplía con los requisitos mínimos para su uso como pieza funcional. Esta técnica fue evolucionando gracias a las mejoras tecnológicas alcanzando en la actualidad la posibilidad de fabricar piezas totalmente funcionales.

A medida que se producían dichos avances, las piezas impresas en 3D se fueron moviendo decididamente del ámbito de la Investigación y el Desarrollo hacia la línea de producción, debido al interés que despertó en diversos ámbitos de la industria.

Esto es debido a que comparada con las técnicas de fabricación tradicionales, esta tecnología permite simplificar el número de pasos de producción o eliminar la necesidad de utillajes, por lo que permite obtener piezas en menos tiempo, más complejas y fácilmente personalizables. Otra diferencia funcional importante es que la Fabricación Aditiva implica mucho menos desperdicio de material al utilizar únicamente el material necesario para la fabricación, lo que implica un menor coste.

Industrias como automoción, aeroespacial y médica se están beneficiando ya de las ventajas de la implementación de la Fabricación Aditiva. En el sector médico permite fabricar piezas únicas y de geometrías complejas personalizadas según las necesidades del paciente, sin el inconveniente que presentan los métodos tradicionales, los cuales requieren mucho tiempo y coste para piezas únicas. También el sector aeroespacial y de automoción, se han beneficiado no sólo de la libertad de geometrías, sino de la posibilidad de obtener piezas ligeras y resistentes sin necesidad de utillajes y con menor cantidad de material, ya que se evita el desperdicio que conllevan los procesos de fabricación sustractiva tradicionales.

A su vez, existen aún limitaciones entorno a la Fabricación Aditiva, como es el acabado superficial, que requiere operaciones de acabado posteriores. Al ser las piezas fabricadas por adición de capas de material, este efecto es apreciable en la superficie y la mejora de esta característica está ligada a la reducción del espesor de la capa, lo que tiene una influencia directa en el tiempo de fabricación final y con ello en la velocidad. Por consiguiente, los procesos de FA resultan efectivos en aquellos casos en los que no se exija una alta calidad superficial y/o no sea necesario un alto número de piezas, puesto que de no ser así el precio de cada pieza aumentaría considerablemente. No obstante, se trata de una técnica con un enorme potencial y en pleno proceso de crecimiento, que presenta una nueva forma de entender la fabricación.

Son muchos los procesos que se incluyen dentro de esta denominación y que en función de sus características permiten obtener piezas con diferencias notables en cuanto a material, precisión, calidad superficial y coste.

Sin embargo, el estudio se va a centrar en el aporte por láser o *Laser Metal Deposition* (LMD), también conocido como *Laser Cladding*, el cual utiliza el láser como fuente de calor para depositar una capa delgada de metal sobre un sustrato en movimiento.

Existen variantes a la hora de depositar el material: inyección de polvo, polvo previamente depositado o alimentación por alambre. Entre estos métodos, el aporte por láser mediante inyección de polvo ha demostrado ser el más efectivo, el rayo láser funde las partículas de polvo y una capa delgada del sustrato en movimiento para depositar una capa.

El proceso de Aporte por Láser presenta diversas ventajas:

- Reducción del tiempo de producción: Esto se debe al poder prescindir de los utillajes, lo cual suponía un problema para el desarrollo de nuevos productos.
- Reparación de una parte: El LMD es un procedimiento que permite aumentar la vida útil de herramientas y componentes de alto valor que de otra manera tendrían que ser reemplazadas, al poder aportar material en zonas localizadas.
- Complejidad geométrica: Se consigue una amplia variedad de geometrías sin la necesidad de encarecer el proceso y facilitando con ello la personalización, que es una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos de alto valor añadido.
- Producción de piezas multimaterial: Este fenómeno se logra mediante la inyección de diferentes materiales durante la fabricación de las piezas.
- Producción de estructuras inteligentes: El LMD por su naturaleza aditiva, ofrece la capacidad de crear una "estructura inteligente" al incrustar objetos como sensores e imanes durante la fabricación.

Si bien el aporte por láser ofrece claramente una serie de ventajas sobre las tecnologías de fabricación convencionales, el proceso también puede tener algunos inconvenientes. Debido a las perturbaciones en el proceso, la calidad del aporte puede variar significativamente. Incluso se pueden observar variaciones de la calidad entre los ciclos de procesamiento realizados utilizando las mismas condiciones de operación. Esta pobre reproducibilidad se debe a la alta sensibilidad del aporte por láser a pequeños cambios en los parámetros operativos, como la potencia del láser, la velocidad del haz y la velocidad de alimentación del polvo.

Por todo lo anterior se ha dado lugar a la realización este proyecto, el cual se centrará en estudiar la implementación del sensor de temperatura, en este caso un pirómetro, con objeto de posibilitar el control de la potencia del láser y así reducir la inestabilidad del mismo.

Para ello se hará uso de un control en lazo cerrado durante el proceso. Este procedimiento ha cobrado gran relevancia en la actualidad debido a que consigue una “autovaloración” de los valores más importantes, es decir, adquirir datos a tiempo real que permitan a un sistema de control ajustar parámetros de forma automática para así poder optimizar el proceso en cada instante.

El proyecto se ha llevado a cabo en la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). En ella se sitúa el Taller del Departamento de Mecánica, donde se encuentra una línea de investigación dedicada al *Laser Cladding*, formada por especialistas en la materia.



ILUSTRACIÓN 1. TALLER DEL DEPARTAMENTO MECÁNICO

3. Objetivos y alcance del trabajo

Este estudio se centra en la optimización del proceso de *Laser Cladding*, para ello se recurrirá a la integración de un pirómetro, el cual proporcionará mediciones de temperatura a tiempo real. Dicha información posibilitará el desarrollo del control en lazo cerrado que permitirá modificar una de las variables más relevantes durante el proceso, la potencia del láser. De esta manera, se logrará reducir la inestabilidad y con ello los errores.

Los objetivos a alcanzar durante el desarrollo del proyecto son:

- Diseño y montaje del soporte para el sistema óptico del pirómetro.
- Diseño y fabricación de la pieza de unión entre soporte y máquina.
- Ensayo de validación de las medidas del pirómetro.
- Desarrollo de la programación del lazo-cerrado.
- Ensayo de validación del lazo-cerrado.

Si bien el sensor de medición de temperatura (pirómetro) ya se encontraba integrado en la máquina de aporte por láser, se busca modificar su soporte para lograr mejores medidas de la temperatura.

Por ello al reparar en el diseño del soporte para el sistema óptico del pirómetro se premiarán tres aspectos; Por un lado, facilitar la disposición coaxial del mismo respecto al láser incluyendo un elemento ajustable. Por otro lado, hacer un diseño cerrado que pueda contener en su interior el sistema óptico del pirómetro con objeto de lograr reducir las perturbaciones en los resultados debidas a reflejos ajenos a lo medido. Por último, que su dimensión y peso sea reducido, debido al espacio limitado.

A continuación, se procederá al diseño de la pieza que sirva de unión entre soporte y máquina, que deberá asegurar la estabilidad del montaje. Al igual que en el caso del soporte se buscará unas medidas y peso total reducidos con objeto de no sobrecargar la zona de forma innecesaria.

Tras colocar todo en su disposición dentro de la máquina, se procederá a la realización de un ensayo que valide las medidas aportadas por el pirómetro.

Por último, en lo referente al desarrollo del sistema en lazo-cerrado se recurrirá a Arduino, el cual consiste en una plataforma con hardware abierto que facilita la programación de microcontroladores. Una vez realizado el programa se incluirá en una placa Arduino Uno para su comprobación.

4. Beneficios que aporta el trabajo

El propio uso del proceso *Laser Cladding* aporta beneficios generales, anteriormente comentados, como son la reducción del tiempo de producción, reparación de una parte en elementos de alto valor añadido, complejidad geométrica facilitando con ello la personalización, producción de piezas multimaterial y producción de estructuras inteligentes en comparación con técnicas convencionales.

Sin embargo, el *Laser Cladding* presenta algunas carencias que han sido motivo de la realización de este proyecto. Por ello, se pueden sacar los beneficios que se pretenden obtener mediante la ejecución de los objetivos determinados con anterioridad en este documento.

En primer lugar, se plantea la mejora general del proceso. La pobre reproducibilidad observada se debe a la alta sensibilidad a pequeños cambios en los parámetros operativos, que han llevado a la integración de sensores para su monitorización. Más en concreto, a la implementación del sensor de temperatura, pirómetro, para tener un control sobre la potencia del láser y así mejorar la estabilidad del mismo.

A su vez, la instalación de sensores aparte de dar información que permita la recopilación de datos, su adquisición a tiempo real permitirá al sistema de control en lazo cerrado ajustar la potencia del láser de forma automática para así poder optimizar el proceso en cada instante.

En segundo lugar, con el nuevo montaje del pirómetro se obtendrán mejoras en las lecturas, al facilitar la disposición coaxial y al reducir las perturbaciones debidas a reflejos de fondo. Esto es posible gracias a un diseño cerrado, que su vez incluye piezas ajustables.

Actualmente, la monitorización y control en los procesos de aporte por láser está cobrando relevancia aunque su implantación resulte compleja. Se debe a que presenta grandes ventajas como son, ampliar el conocimiento acerca del proceso y los aspectos que tienen lugar en él y aún más importante que podría lograr establecer el aporte por láser como alternativa a los métodos tradicionales de producción. Se lograría producir piezas de alta calidad, con mínimos rechazos y con una gran repetibilidad.

5. Análisis del estado del arte

5.1 Laser Cladding

Una de las tecnologías más novedosas tanto en la industria como en los centros de investigación son los procesos de Fabricación Aditiva.

La Fabricación Aditiva de metales consiste en manipular material en forma de polvo o hilo, fundirlo mediante un haz de alta potencia y depositarlo de forma precisa construyendo así un sólido. Esto permite obtener piezas de geometría casi igual que la final, aunque posteriormente necesitará una etapa de mecanizado para mejorar la precisión geométrica y el acabado superficial.

Ahora se centrará la atención en el *Laser Cladding*, técnica que emplea gran parte de la energía de un haz láser para crear un baño fundido en una región determinada del sustrato, para acto seguido realizar el aporte de las partículas de metal que también han absorbido una pequeña parte de dicha energía. Durante este fenómeno, las partículas de metal fundido se mezclan rápidamente en la masa fundida, como consecuencia de esta adición se genera una fina capa llamada *clad* o cordón en el sustrato.

Básicamente, el *Laser Cladding* dispone de dos técnicas diferenciadas, proceso en dos pasos (predepositado) y proceso en un único paso.

En el proceso de dos pasos, la primera fase consiste en depositar una capa de polvo para que en una segunda fase el láser entre en escena y la capa de polvo pre-depositado se funda con el sustrato.

En éste proceso las partículas en forma de polvo deben tener un alto grado de unión con el sustrato y entre ellas, dado que existe un gas de protección, generalmente argón, necesario para evitar la oxidación de la piscina de material fundido que se crea en el sustrato cuando el láser está activo. Por ello se emplea un agente químico cuya misión es la de mantener unidas las partículas mientras exista un flujo de gas protección. Sin embargo, este agente químico debido al calor del láser se evapora y esto genera la mayor desventaja de este proceso: el elevado grado de porosidad.

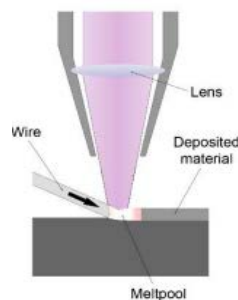


ILUSTRACIÓN 2. LASER CLADDING DE DOS ETAPAS

En el caso de *Laser Cladding* de una etapa, el material aditivo se alimenta al conjunto de fusión de dos formas, por inyección de polvo o por hilo.

Dado que el proyecto se ha desarrollado con *Laser Cladding* de una etapa por inyección de polvo, se centrará en este caso.

El proceso se caracteriza por la inyección de las partículas de metal a través de toberas, para lo cual existen tres tipos de inyección lateral, coaxial discreta y coaxial continúa.

En la inyección lateral se tiene como ventaja la sencillez, sin embargo, limita el proceso únicamente a la dirección de la de inyección.

La inyección coaxial discreta, con objeto de solventar el problema anterior colocó varias toberas en diferentes posiciones para generar una superficie de aporte mayor.

Sin embargo, aunque los anteriores sistemas tienen como ventaja la sencillez y economía, las boquillas coaxiales continuas, disponen de una precisión y optimización mayores. Se componen de dos conos que llevan el polvo para el aporte justo al lugar deseado de manera coaxial al haz láser. Boquilla empleada para este proyecto.

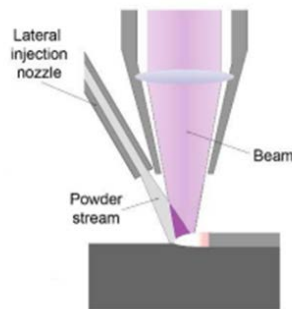


ILUSTRACIÓN 3. BOQUILLA LATERAL

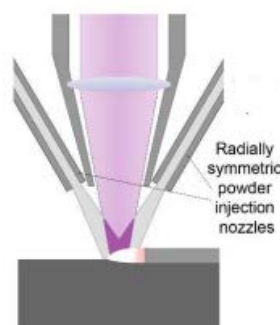


ILUSTRACIÓN 4. BOQUILLAS COAXIAL DISCRETA

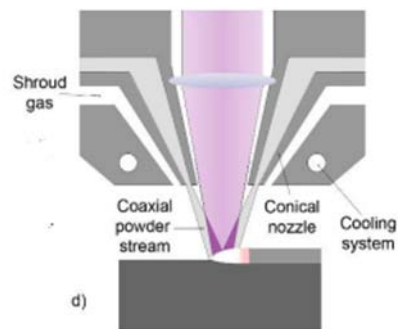


ILUSTRACIÓN 5. BOQUILLAS COAXIAL

Cabe mencionar, tal cual se ve en la ilustración de la boquilla coaxial, la utilización de gas inerte, generalmente argón, como medio protector ante la tendencia a oxidarse de los materiales metálicos empleados durante el proceso. Este se inyecta simultáneamente al polvo mediante la boquilla creando una atmósfera protectora.

En cuanto a las aplicaciones de este proceso a parte de la fabricación directa de piezas, también se puede realizar recubrimientos y reparaciones.

El recubrimiento consiste en la deposición de una capa delgada de material sobre el sustrato, lo cual modifica las propiedades de su superficie a las del material depositado. Esto permite lograr una combinación de propiedades que el sustrato por sí solo no podría lograr, convirtiéndolo en un material compuesto. Se suele emplear para crear una capa duradera y resistente a la corrosión mientras el núcleo proporciona la capacidad de soporte de carga.

La reparación y reacondicionamiento de piezas permite rescatar componentes de alto valor que han sufrido algún tipo de desgaste o rotura para así alargar su vida útil. Los métodos convencionales utilizan la soldadura, sin embargo, debido a la temperatura altamente distribuida en el área de reparación, da lugar a una baja calidad mecánica, grietas, porosidad y una vida útil muy corta del componente. El *Laser Cladding* por su parte puede proporcionar una reparación y renovación estructural permanente en muchas aleaciones. El éxito se debe a la pequeña zona de calor, la rápida solidificación, la mínima dilución, la baja y controlable entrada de calor en el sustrato, la gran flexibilidad del proceso y a la reducida distorsión.

Cabe mencionar el proyecto alcanzado con éxito de la mano de la coalición Danobat S.Coop.-Ideko IK4, la cual instaló un sistema de aporte por láser para reparación de álabes de compresor para Iberia mantenimiento que en la actualidad se encuentra funcionando.

Gracias al proceso de recuperación por láser los álabes recuperados presentan unas propiedades de fatiga incluso mejores que las de la pieza original, alargando así la vida del álabe. [7]

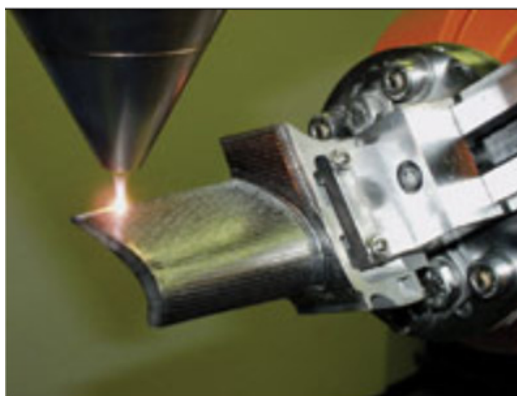


ILUSTRACIÓN 6. PROCESO DE REPARACIÓN POR LASER CLADDING DE UN ALABE DE COMPRESOR

A continuación, se van a exponer los parámetros con mayor influencia durante el proceso que han dado lugar a la necesidad de considerar la implantación de sensores junto a un sistema de control.

Una gran variedad de parámetros operativos y fenómenos físicos determinan la calidad del *Laser Cladding* y se agrupan como entradas, procesos y salidas.

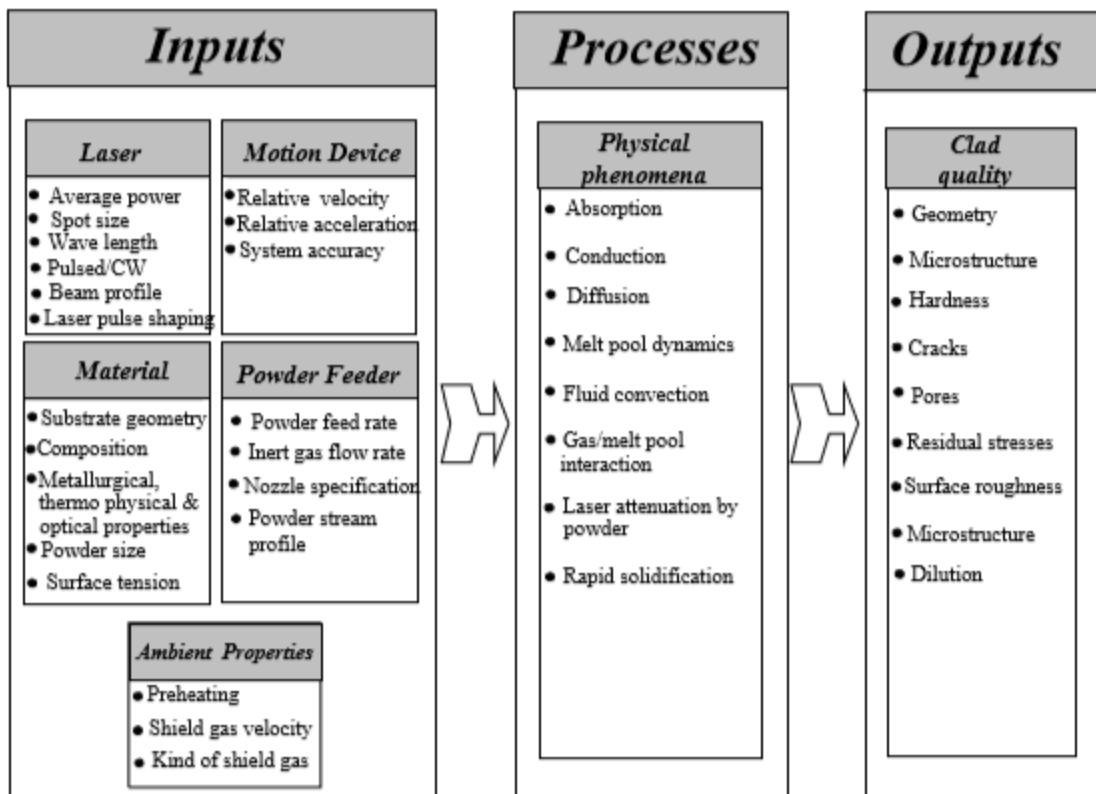


ILUSTRACIÓN 7. PARÁMETROS DE ENTRADA, PROCESO Y SALIDA EN *LASER CLADDING*

Las entradas son el láser, el dispositivo de movimiento, el alimentador de polvo y también las propiedades del material y del ambiente. Los resultados del proceso que representan la calidad de lo producido son la geometría, la microestructura, las grietas, la porosidad, la rugosidad de la superficie, las tensiones residuales y la dilución.

5.2 Pirómetro

La piroimetría es la medida de la temperatura de la superficie de un objeto por las características de la radiación que emite. Todo objeto cuya temperatura está por encima del cero absoluto (-273.15 ° C) emite radiación. Esta emisión es radiación de calor y depende de la temperatura. El término radiación infrarroja también se usa porque las longitudes de onda de la mayoría de esta radiación se encuentran en el dominio infrarrojo.

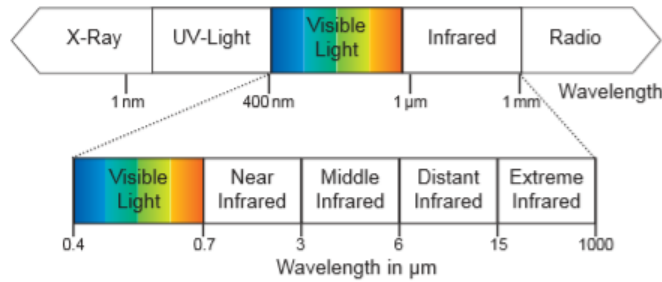


ILUSTRACIÓN 8. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La radiación infrarroja transporta energía, la cual ayuda a determinar la temperatura de un cuerpo que se está midiendo. La radiación térmica emitida de un objeto es recibida por un dispositivo de detección sin contacto y transformada en señales eléctricas, los instrumentos que determinan la temperatura de un objeto de esta manera se llaman pirómetros.

A continuación, para justificar la elección del pirómetro se ha realizado una tabla comparativa frente a termómetros de contacto.

	Pirómetro	Termómetro de contacto
Respuesta	Tiempo de respuesta corto. Mide la radiación y muestra la temperatura en fracciones de segundo sin necesidad de contacto.	La sonda en contacto con el objeto debe alcanzar primero la misma temperatura del objeto y esto lleva tiempo debido a la conducción.
Influencia en la medición	Utiliza una parte de la energía que emite el objeto de todos modos. Por lo tanto, el acto de medir por sí mismo no influye en la temperatura del objeto.	Al medir, la necesidad de alcanzar la temperatura en el punto de contacto provoca la pérdida de calor del objeto que a su vez puede cambiar la temperatura en el punto de contacto.

Vida útil	Al realizar las mediciones sin contacto disponen de mayor duración.	Sufren mayor desgaste al estar expuestos directamente en el contacto.
Objeto en movimiento	Debido al rápido tiempo de respuesta del pirómetro, las temperaturas de los objetos en movimiento se pueden determinar con precisión.	Pueden influir en las lecturas de la temperatura debido a la fricción de la sonda de temperatura deslizante.
Objetos de difícil medición	Los objetos que no se pueden alcanzar físicamente pueden ser medidos por pirómetros. Todo lo que necesitan es una línea clara al objeto.	Al precisar contacto para medir hay objetos que por su dificultad de alcance no podrán ser medidos.

TABLA 1. COMPARATIVA ENTRE PIRÓMETRO Y TERMOPARES

Por todo lo anteriormente comentado se ha optado por el uso del pirómetro, aunque para validar los resultados del ensayo también se emplearán termómetros de contacto como son los termopares, sin colocarlos directamente donde incide el láser para evitar su fundición.

Ahora se expondrán algunos de los diferentes tipos de pirómetros presentes en el mercado, entre los cuales destacan los pirómetros de banda espectral, los pirómetros de banda total y los pirómetros de 2 colores.

En lo referente a los pirómetros de banda estrecha funcionan sobre un rango estrecho de longitudes de onda. Estos sensores infrarrojos utilizan filtros para restringir la respuesta a una longitud de onda seleccionada. Los de onda corta se utilizan para medir temperaturas altas, ya que el contenido de energía de radiación aumenta a medida que las longitudes de onda se acortan y los de onda larga para temperaturas bajas.

A su vez, los pirómetros de banda ancha son, en general, los dispositivos más sencillos y económicos. Los topes inferior y superior de banda ancha son una función del sistema óptico específico que se utilice. Se denominan de banda ancha porque miden una fracción significativa de la radiación térmica emitida por el objeto en los rangos de temperatura de uso normal. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el vapor de agua, el polvo, el humo y el vapor presentes en la atmósfera pueden atenuar la radiación emitida por el objeto y provocar que el pirómetro dé una lectura baja.

En cuanto a los pirómetros de banda total están diseñados para detectar más del 90% de la radiación emitida de un objeto. Esto requiere detectores especiales, lentes y filtros que son sensibles a casi todo el espectro. Hoy en día, rara vez se utilizan debido a los principales errores experimentados.

Por último, los pirómetros de 2 colores miden la radiación utilizando dos longitudes de onda diferentes, luego calculan la relación a partir de las señales y finalmente determinan la temperatura. Cuando se forma la relación, la emisividad se elimina como parte de los cálculos; en otras palabras, la medición de la temperatura se vuelve independiente de la emisividad del objeto. Las longitudes de onda están muy juntas para igualar, en la medida de lo posible, la emisividad. La técnica de relación puede eliminar o reducir errores en la medición de temperatura provocados por cambios en la emisividad, el acabado de la superficie e incluso por presencia de interferencias como humo o materia suspendida que absorben energía, siempre que se produzcan por igual en ambas longitudes de onda.

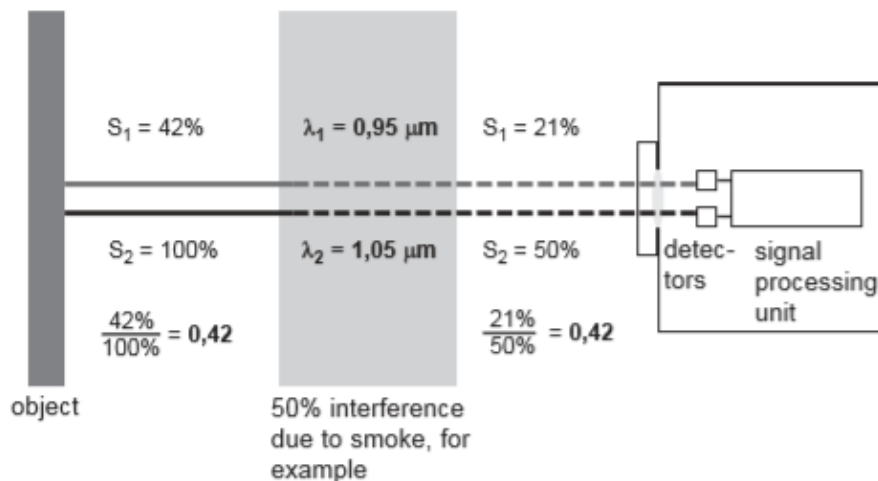


ILUSTRACIÓN 9. ESTRUCTURA DE UN PIRÓMETRO DE DOS COLORES

Los pirómetros de 2 colores se utilizan para tareas de medición difíciles, como son:

- Altas temperaturas
- Vistas bloqueadas o interferencias en la atmósfera (humo, materia en suspensión)
- El objeto es más pequeño que el tamaño del punto (hasta un 10% del tamaño del punto)
- Emisividad cambiante, baja o desconocida

Por todo ello, el pirómetro de dos colores es el que mejores prestaciones aporta para el desarrollo del proyecto.

6. Análisis de Riesgos

Durante la realización de este proyecto pueden surgir problemas que necesitan ser resueltos de forma eficiente. Por ello, resulta conveniente recurrir a la matriz de probabilidad-impacto para evaluar el factor riesgo de cada problema y así llevar una correcta gestión y control del trabajo.

Riesgo = Probabilidad x Impacto

Probabilidad	Alta	Medio	Alto	Alto
	Media	Bajo	Medio	Alto
	Baja	Bajo	Bajo	Medio
		Baja	Media	Alta
		Impacto		

ILUSTRACIÓN 10. MATRIZ PROBABILIDAD IMPACTO

Ante un riesgo alto es necesario planificar una respuesta, ante uno medio es necesario considerarlo y finalmente ante uno bajo se podría desatender el proceso, pero con una correcta monitorización. A continuación, se presentan los riesgos considerados durante el presente estudio:

- Rotura o mal funcionamiento del pirómetro:

Probabilidad	→	Media	}	Riesgo → Alto
Impacto	→	Alto		

El mal funcionamiento o rotura del pirómetro de dos colores supondría su envío a Alemania para su reparación. Este hecho produciría retrasos respecto a las fechas programadas para la finalización del proyecto. Una posible solución para solventar dicho problema, sería optar por el uso del otro pirómetro de dos colores con menor rango de temperaturas para poder validar el buen funcionamiento del programa de control.

- Mala calibración del pirómetro:

Probabilidad	→	Media	}	Riesgo → Bajo
Impacto	→	Bajo		

El no conseguir el valor real de la temperatura no supone un gran riesgo, ya que el objetivo principal es obtener una medida lo más estable para poder emplearla como señal de entrada en el sistema de control.

- Malas conexiones eléctricas:

Probabilidad	→	Baja	}	Riesgo → Bajo
Impacto	→	Medio		

Con el debido cuidado la posibilidad de daños en el equipo debido a fallos eléctricos es baja.

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

7. Equipo y material empleado

Los ensayos se han llevado a cabo en un centro de mecanizado Kondia Aktinos 500 reconvertido en un centro de 5 ejes mediante la adición de una mesa divisora de 2 ejes. Las características se determinan a continuación:



Control Numérico	Fagor 8070
Superficie de trabajo	700x360 mm
Velocidad	15000mm/min
Precisión de posicionamiento	±0,01
Repetitividad	±0,005 mm
Resolución	0,001 mm

El láser empleado ha sido el modelo Rofin FL010 de 1kW de potencia máxima, que al tratarse de un láser en estado sólido puede propagarse a través de la fibra óptica.



Modelo	ROFIN FL010
Potencia	1000 W
Longitud de onda	1,08±10 nm
Tamaño de haz	600 µm
Cinemática	Kodia Aktinos-500

Para posibilitar el intercambio de calor de los circuitos del láser y así evitar su sobrecalentamiento se ha empleado el equipo KKT Kraus.



El pirómetro utilizado para la obtención de la temperatura es el IMPAC pyrometer IGAR 12-LO (de LumaSense Technologies) de dos colores. Cuyas características se nombran a continuación:



Modelo	IGAR 12-LO
Rango de temperatura	550 ... 2500 °C
Rango espectral	λ_1 : 1.28/ λ_2 : 1.65 μm

8. Optimización de la medida de temperatura

La medición de temperatura se realizará con el pirómetro de dos colores IMPAC pyrometer IGAR 12-LO, que según se ha demostrado con anterioridad es la mejor opción para la realización de este proyecto.

También resulta de gran relevancia la selección de su disposición de forma coaxial al cabezal del láser o de forma externa directo al láser. En función de estudios y ensayos realizados en trabajos previos, se determinó que la colocación del pirómetro de forma coaxial asegura que la medida de la temperatura se toma en el baño fundido y con una mayor estabilidad en los resultados. Esta información resulta de gran interés, ya que dicha señal se pretende usar como entrada a un sistema de control en lazo cerrado.

Algunas de las ventajas del posicionamiento coaxial frente al externo son, que se asegura la medición en el baño fundido, en lugar de puntos anteriores o posteriores, dado que se reducen las vibraciones frente a la disposición externa. Asimismo, se elimina la posibilidad de colisión con otros elementos de la máquina durante el proceso de funcionamiento y obstáculos en la trayectoria óptica entre el pirómetro y el sustrato.

Para la utilización de dicha disposición se requiere una lente dicróica en la trayectoria del láser. La función de dicha lente es la de separar la luz de forma espectral, transmitiéndola o reflejándola en función de la longitud de onda. En este caso la lente instalada permite el paso de la longitud de onda del láser (1064 nm), pero refleja el resto de longitudes.

En conclusión, la radiación emitida por el baño fundido será reflejada por la lente dicróica para luego alcanzar el espejo que la conducirá hasta la óptica del pirómetro. Sin embargo, durante el camino parte de la radiación emitida ha sido absorbida por el espejo, por ello hay emplear una constante de corrección para compensarlo y así obtener una medida de la temperatura real.

Otro aspecto a considerar, es que en el pirómetro el punto focal es variable, lo que permite regular la distancia focal para que coincida con la del láser. Sin embargo, a pesar de ajustarlo a la distancia correcta, al pasar por la lente convergente de la boquilla el haz de la radiación que llega al pirómetro converge de nuevo, de forma que ya no coincidirá con el punto focal del láser. Esto implica añadir una lente plana-convergente intermedia, para que el punto focal de ambos sea el mismo. De este modo, se consigue que el pirómetro mida en el punto exacto en el que actúa el láser.

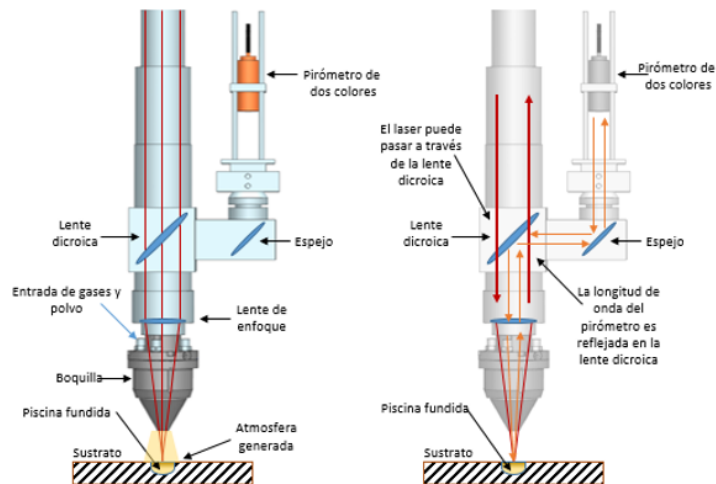


ILUSTRACIÓN 11. ESQUEMA POSICIONAMIENTO PIRÓMETRO

8.1 Diseño y montaje del soporte para la óptica del pirómetro

Con toda esta información se puede describir el criterio seguido para el desarrollo del soporte de la óptica del pirómetro.

En primer lugar, con objeto de reducir el ruido debido a reflejos de fondo se opta por tubos de lentes de aluminio de 1". Por su parte, el tubo SM1M30 con rosca interior contiene en su interior el sistema óptico del pirómetro sujeto por dos anillos roscados. Asimismo, en el tubo SM1V15 con rosca exterior se encuentra la lente plana-cóncava también sujeta por un anillo roscado en un extremo con rosca interior. A su vez, para facilitar la regulación de la distancia focal y hacerla coincidir con la del láser, se recurre a un tubo SM1L40 con rosca interior que permite variar la separación entre sistema óptico y lente, hecho posible al situarse sobre el tubo SM1V15. En segundo lugar, para hacer coincidir la lectura de una forma más precisa con el punto exacto donde se produce el *melt pool* se incluye un elemento de traslación en el plano XY denominada CXY1 enlazada a los tubos mediante una pieza de unión SM1T2. Los planos de todas las piezas nombradas se encuentran incluidos en el anexo.

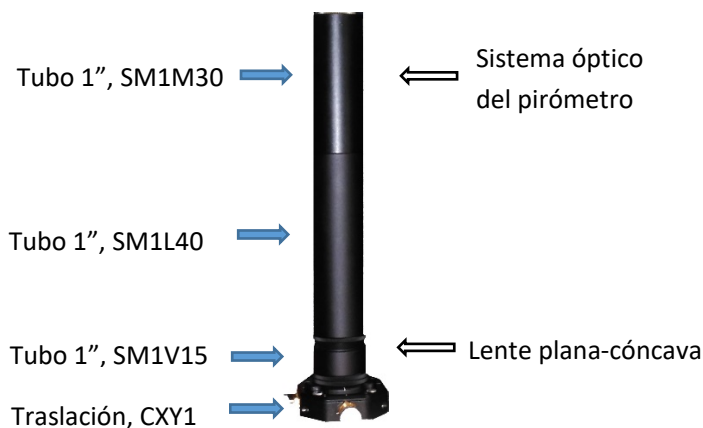


ILUSTRACIÓN 12. SOPORTE ÓPTICA PIRÓMETRO

8.2 Diseño y fabricación de la pieza de unión entre soporte y máquina.

A continuación, se procede al diseño y realización de la pieza de unión entre soporte y máquina, que estará compuesta de un elemento superior e inferior unidos por tornillos para asegurar su buena sujeción con la máquina.

Inicialmente, se procedió a su diseño y dimensionamiento a través del programa NX, según se muestra en el anexo. Seguidamente, a su desarrollo partiendo de dos macizos de aluminio, material adecuado por su fácil maquinabilidad y baja densidad, que fue mecanizado mediante la máquina CNC Kondia A6.

En primer lugar, para la pieza superior se realizó el planeado de todas las caras para asegurar su planitud y paralelismo. En segundo lugar, se procedió con la cajera central circular para lo cual se realizó un ciclo de taladrado profundo para la introducción de la fresa de desbaste y por último realizar el proceso de acabado. Por su facilidad de uso se recurrió al taladro vertical para realizar los agujeros pasantes, de los cuales los cuatro centrales empleados para sujetar la pieza de traslación en XY fueron roscados a mano mediante un macho de roscar.

Por su parte, a la pieza inferior también se le realizó un planeado a todas las caras para asegurar la planitud y paralelismo y sus cuatro agujeros pasantes se realizaron en el taladro vertical.

Tras finalizar con la fabricación de ambas piezas se sometieron a una limpieza por ultrasonido para retirar toda viruta y grasa residual procedente de su mecanizado, al igual que a un baño de acetona para eliminar la humedad.



ILUSTRACIÓN 13.
MECANIZADO PIEZAS SOPORTE

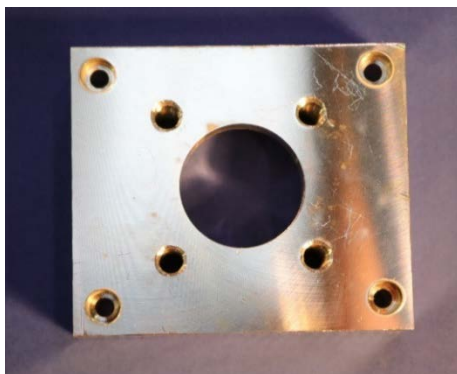


ILUSTRACIÓN 14. PIEZA SUPERIOR PARTE DE ARRIBA

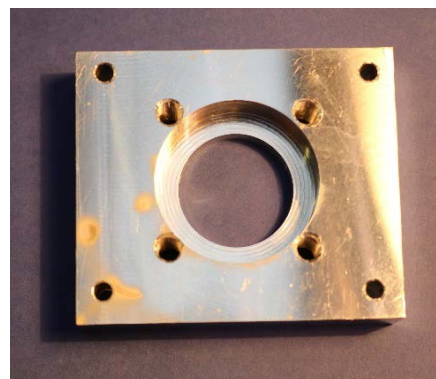


ILUSTRACIÓN 15. PIEZA SUPERIOR PARTE DE ABAJO

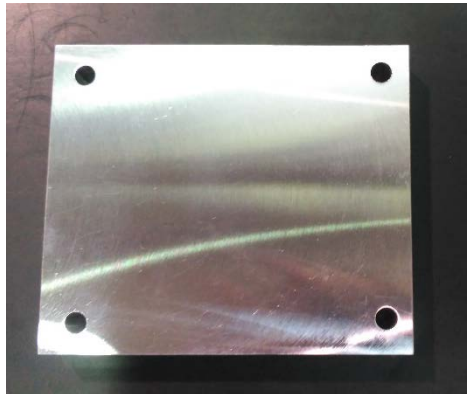


ILUSTRACIÓN 16. PIEZA INFERIOR

Mediante las siguientes imágenes se ilustra el antes y el después del soporte para el sistema óptico del pirómetro más la piezas de unión a la máquina.

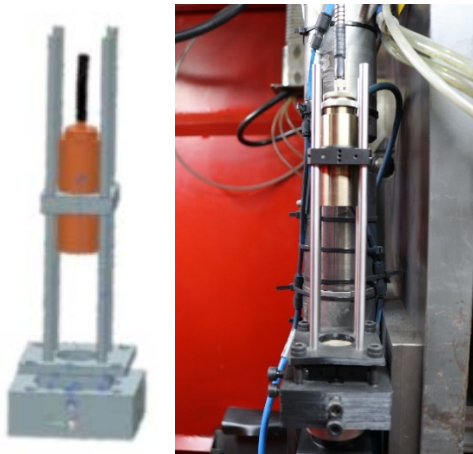


ILUSTRACIÓN 17. SOPORTE ANTES

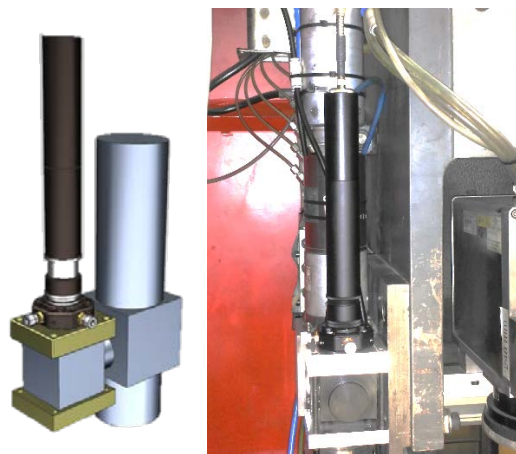


ILUSTRACIÓN 18. SOPORTE DESPUÉS

8.3 Ensayo de validación de las medidas del pirómetro.

Con objeto de validar el nuevo montaje del pirómetro se procedió a la realización de un ensayo consistente en la adición de Inconel 718 sobre un voladizo del mismo material.

Para ello se fabricó un útil que permitió el empotramiento en uno de los extremos de la chapa de Inconel dejando el otro extremo libre.

Para fabricar el útil se utilizaron dos tacos de aluminio, para la parte inferior y superior del amarre. Dichos tacos han sido taladrados concéntricamente con dos agujeros cada uno separados en 50 mm. Uno de ellos pasante en ambos tacos con una broca de 12,75 mm por el que pasa un tornillo M12x80mm al que se le añade una tuerca al final. Para el otro se ha usado la misma broca en el taco superior y una de 10,2 mm en el inferior, que luego se ha roscado manualmente mediante un macho de roscar para introducir un tornillo M12x60mm. Para asegurar un buen empotramiento y evitar zonas de concentración de tensiones se rectificó la cara perpendicular a la chapa que forma el voladizo.



ILUSTRACIÓN 19. TALADRADO ÚTIL ILUSTRACIÓN 20. ROSCADO ÚTIL ILUSTRACIÓN 21. RECTIFICADO ÚTIL

La chapa a su vez se obtuvo de una chapa mayor de Inconel 718 con espesor 2 mm, la cual se cortó para obtener un ancho de 30 mm por electroerosión con objeto de asegurar el paralelismo de sus caras.

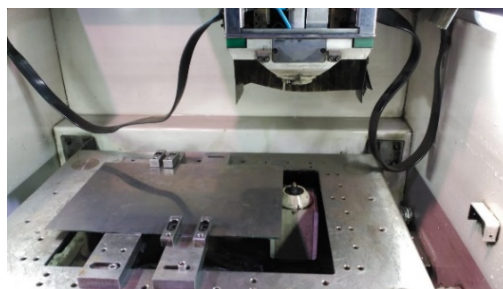


ILUSTRACIÓN 22. CORTE CHAPA POR ELECTROEROSIÓN

Para llevar a cabo el ensayo se amarra la chapa al útil simulando el empotramiento, dejando 220 mm de voladizo.

Seguidamente, se procedió a realizar el montaje o *set up* dentro de la máquina de láser en el que se incluyeron el pirómetro de dos colores, un termopar fino y otro termopar grueso para conocer las temperaturas en función del tiempo. Concretamente, el termopar fino se colocó en contacto con la cara inferior, en el centro de la chapa y a 100 mm del extremo libre. Por su parte, el termopar grueso se colocó en contacto con la cara superior a 3 mm del borde y a 150 mm del extremo libre. Los datos obtenidos por los termopares serán una forma de validar los datos aportados por el pirómetro.

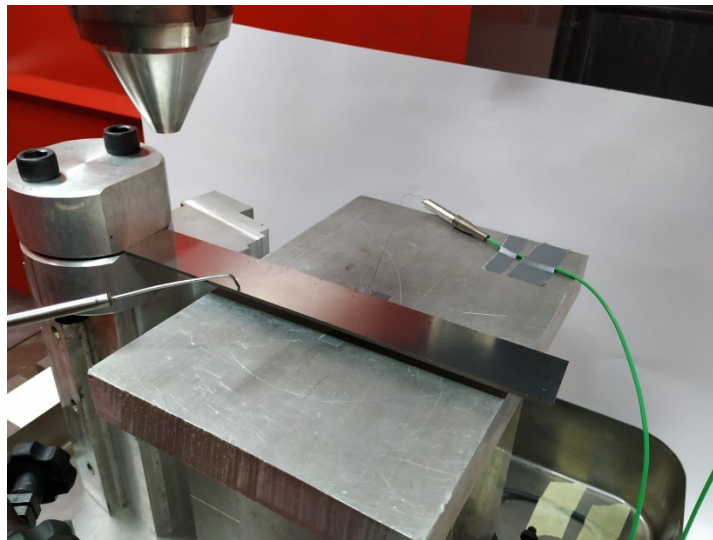


ILUSTRACIÓN 23. SET UP DEL ENSAYO

Con todo montado se procedió a realizar la adición del material en forma de cordón longitudinal mediante el láser a lo largo de 180 mm. Durante este proceso se empleó 650 W de potencia y 8,27 g/min de velocidad de alimentación de polvo metálico.

Cabe mencionar que previo a la adición del material, se optó por medir en el microscopio Leica DCM3D una serie de puntos de la chapa que tras el ensayo se volvieron a medir para así conocer la deformación producida.

8.4 Control potencia

Se busca controlar la variable del láser correspondiente a la potencia a través de la medición de la temperatura a tiempo real, durante el proceso de aporte, haciendo uso del pirómetro. Dicha información servirá de entrada al sistema de control cerrado, en el que se establecerá la temperatura deseada para lograr mantenerla y así no dañar la pieza.

Se pensó en un sistema de control proporcional al que se le introduce la temperatura de entrada, que será la temperatura de referencia que se desea mantener constante durante el proceso de aporte. Tras establecer un valor de potencia del láser e iniciar el proceso, la medición de la temperatura realizada mediante el pirómetro colocado en este caso en posición coaxial, es comparada con la de referencia. Si ambos valores no coinciden, el control actúa regulando la potencia.

Cabe mencionar, que durante el desarrollo del sistema de control cerrado se produjo la rotura del pirómetro de dos colores tras aportar resultados incoherentes de saturación. Por ello, se tuvo que proceder a su envío a Alemania que supuso retrasos y el empleo de otro pirómetro de menos rango de temperaturas. Este hecho lo hacía incompatible con su uso en máquina pero servía para realizar comprobaciones del sistema de control.

Tras la reparación se procedió a verificar su buen funcionamiento mediante la realización de un sencillo ensayo. Se hizo uso del horno situado en el taller y en él se calentó a 900°C una pieza de Inconel. Cuando esta alcanzó el valor determinado se tomó la temperatura y mostraba valores cercanos por lo que su funcionamiento era correcto.

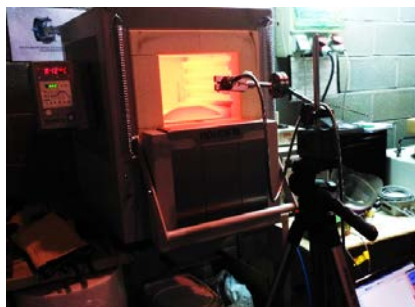


ILUSTRACIÓN 24. ENSAYO VERIFICACIÓN BUEN FUNCIONAMIENTO

Debido a este contratiempo con el pirómetro, junto a problemas de señal con el sistema de control cerrado se deja como línea futura continuar con el desarrollo de la monitorización.

9. Resultados

A continuación, se van a exponer los resultados obtenidos en el ensayo de validación de las medidas del pirómetro.

Como se puede observar la intensidad de señal recibida por el pirómetro es en torno al 17%, por lo que siempre se mantiene superior al 5% el umbral para poder considerarla aceptable. Intentar alcanzar una señal del 100% resulta un hecho idealizado, ya que en la realidad se encuentran polvo y gases que interfieren en la señal.

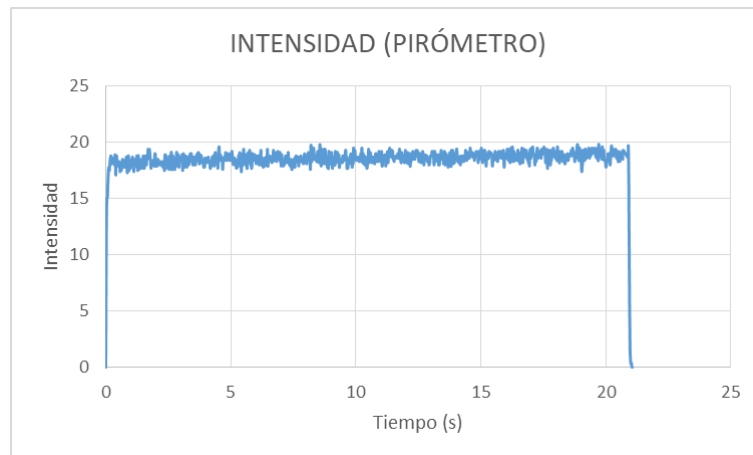


ILUSTRACIÓN 25. INTENSIDAD PIRÓMETRO

En cuanto a la temperatura, aunque se mantiene en torno a 1800°C se perciben variaciones que pueden afectar al producto final. Este hecho es el que se busca corregir mediante un control de temperatura que la mantenga constante para evitar dañar la pieza.

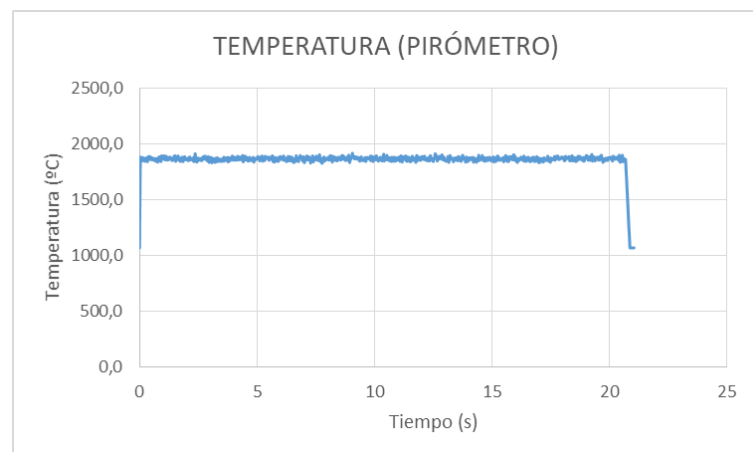


ILUSTRACIÓN 26. TEMPERATURA PIRÓMETRO

Ahora se van a estudiar los datos aportados por el termopar fino. Por simple observación, se aprecia una gran diferencia con respecto a la gráfica de temperatura aportada por el pirómetro, en la que la lectura era prácticamente continua en contraposición al pico registrado en este caso. El termopar al estar situado en un punto fijo de la parte inferior de la placa registra un pico que refleja el momento en el que láser incide en esa zona seguido de la pérdida de calor por conducción.

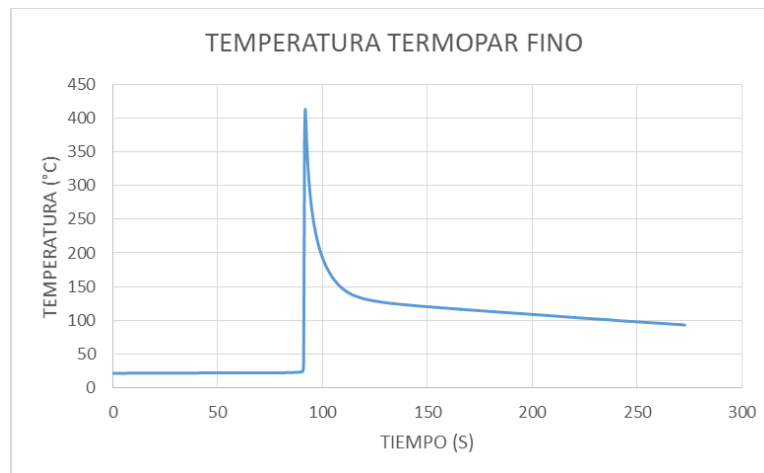


ILUSTRACIÓN 27. TEMPERATURA TERMOPAR FINO

Por su parte, el termopar grueso situado en la parte superior de la placa registra también un pico. Sin embargo, en lugar de estar seguido por un descenso continuado de temperatura como el fino, existe un nuevo ascenso. El pico al igual que el caso anterior representa el momento en el que el láser incide en una zona cercana. En cuanto al nuevo ascenso, se debe a que se sitúa más alejado que el termopar fino representando la conducción de calor que llega de la refrigeración del centro del voladizo.

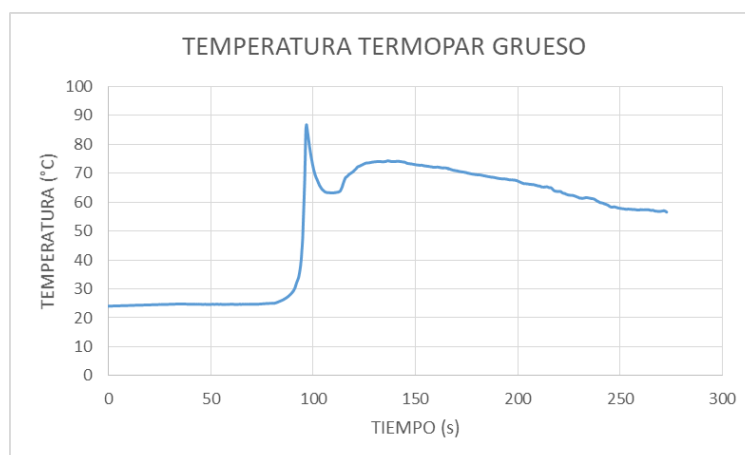


ILUSTRACIÓN 28. TEMPERATURA TERMOPAR GRUESO

A su vez, se aprovechó para observar la deformada que se producía en el voladizo a causa del aporte de un cordón por el proceso *Laser Cladding*. En primer lugar, antes de realizar en ensayo se señalaron en la chapa 12 puntos, empezando desde el empotramiento y terminando en el extremo libre guardando una separación entre ellos de 20 mm. A continuación, haciendo uso del microscopio Leica DCM3D se registraron las diferentes alturas de los puntos que tras el ensayo se volvieron a medir para así obtener la deformada. Por las dimensiones del cabezal del microscopio resultaba inviable tomar las medidas de los tres primeros puntos pero ante la necesidad de tomar como referencia el punto del empotramiento se recurrió a la colocación de una cala de 20 mm junto al empotramiento. Esto permitió tomar la medida de la altura hasta la cala y tras sumarle las dimensiones de la misma se obtuvo la altura total hasta dicho punto del empotramiento.

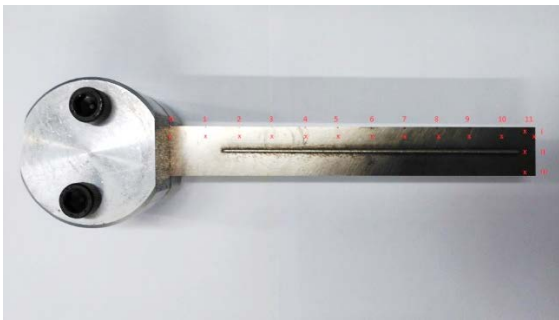


ILUSTRACIÓN 29. PUNTOS MEDIDOS EN EL VOLADIZO

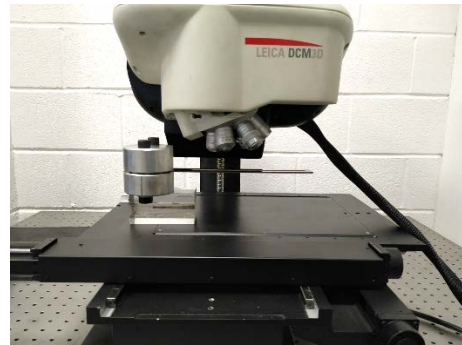


ILUSTRACIÓN 30. TOMA DE DATOS MICROSCOPIO LEICA

El gráfico azul se corresponde con el estado del voladizo previo al ensayo que se encuentra en alturas negativas tras haber determinado como punto de referencia el empotramiento. Este hecho se explica debido al efecto de la gravedad.

Por su lado, el gráfico naranja se corresponde con el estado del voladizo tras el ensayo. En este caso presenta una forma ascendente debido a la contracción del cordón tras enfriarse a temperatura ambiente lo que provoca tensiones en el voladizo.

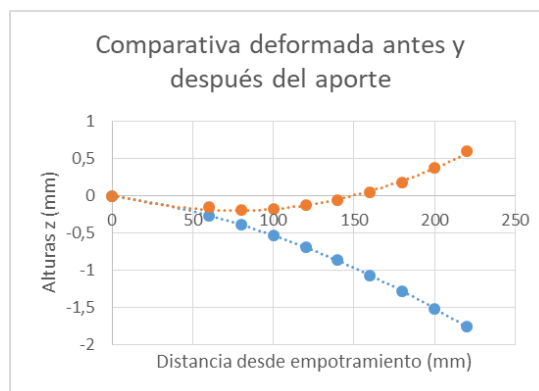


ILUSTRACIÓN 31. DEFORMADA VOLADIZO

10. Diagrama de Gantt

A continuación, se describen las tareas presentes en el Diagrama de Gantt:

- **T1 - Planteamiento del proyecto:**

En primer lugar, se realiza una estructura provisional del proyecto, para poder establecer el orden del trabajo a realizar en el taller de la escuela y determinar los objetivos a lograr.

- **T2 – Documentación previa:**

- T2.1 - Buscar Información
- T2.2 - Leer libros relacionados
- T2.3 – Observar el trabajo del taller

Previo al inicio del desarrollo del proyecto, se emplea un tiempo en buscar información y leer libros referentes al proceso de *Laser Cladding* y al funcionamiento del pirómetro. Asimismo, se aprovecha para ver la forma de trabajo en el taller y familiarizarse con el entorno.

- **T3 – Diseño y fabricación:**

- T3.1 - Diseño soporte
- T3.2 - Diseño pieza unión
- T3.3 - Corrección errores
- T3.4 - Fabricación pieza unión
- T3.5 - Pedido piezas soporte
- T3.6 - Llegada pedido

Esta tarea incluye todos los pasos necesarios hasta la consecución del soporte y pieza de unión necesarios para la colocación del pirómetro en la máquina de láser.

- **T4 – Ensayo**

- Planificación
- Montaje *set up*
- Realización ensayo
- Análisis de datos

Con objeto de validar las medidas del pirómetro en su nueva disposición se procede a la planificación y realización de un ensayo, para lo cual se procederá al montaje de todo el *set up*. Tras su ejecución y toma de datos, estos se analizan para determinar la calidad de los resultados.

- **T5 – Programación:**

- Familiarización Arduino
- Desarrollo
- Ensayo validación

Familiarización y desarrollo del sistema de control cerrado a través de Arduino, el cual consiste en una plataforma con *hardware* abierto que facilita la programación de microcontroladores. Una vez realizado el programa se incluirá en una placa Arduino Uno para su comprobación.

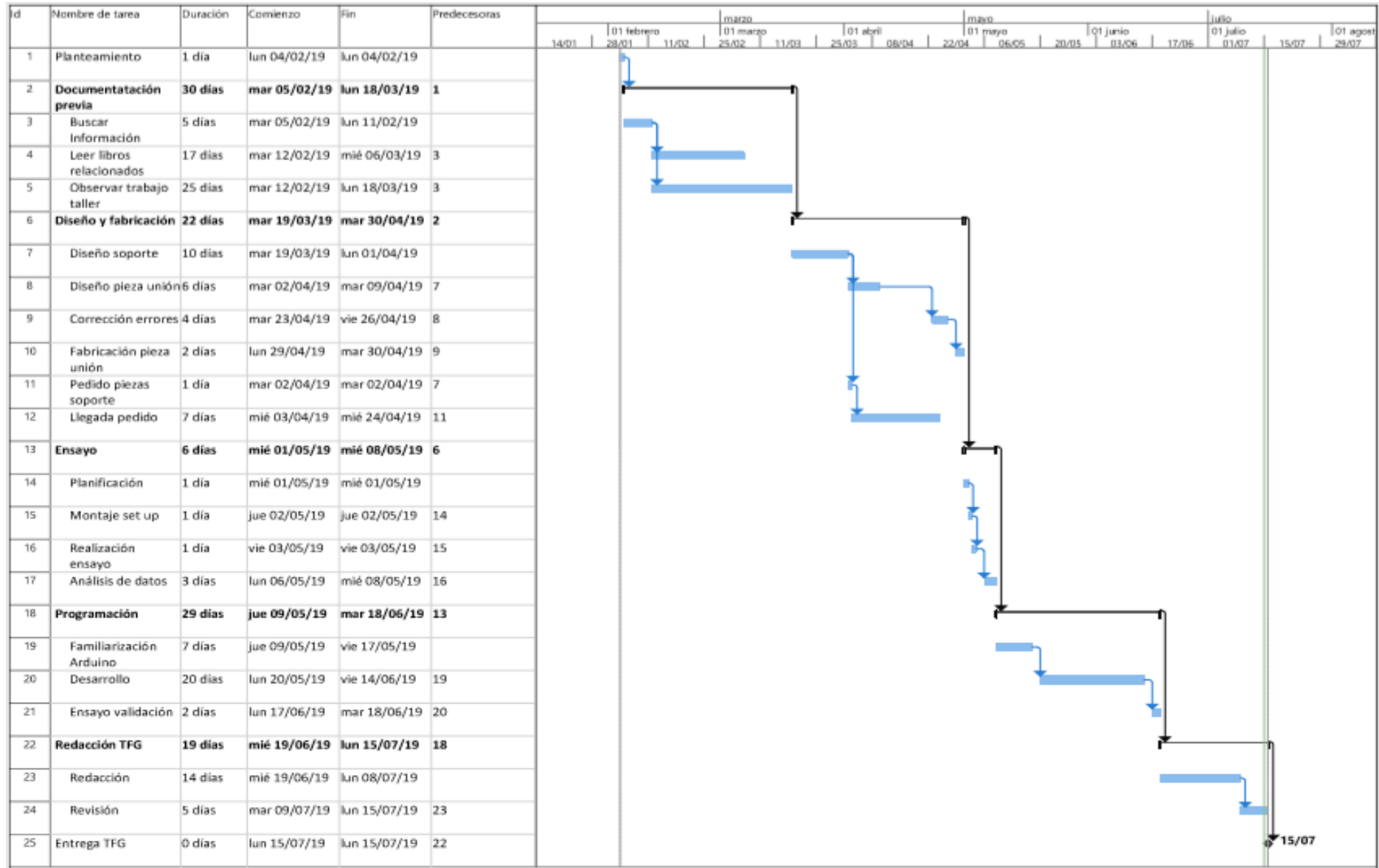
- **T6 - Redacción Trabajo Fin de Grado:**

- Redacción
- Revisión del documento y corrección de errores

Redacción y revisión del documento para poder hacer correcciones o mejoraras en el mismo.

- **T7 – Entrega Trabajo Fin de Grado:**

Entrega definitiva del documento



11. Presupuesto

Se detalla a continuación el presupuesto necesario para llevar a cabo este estudio experimental. Para ello, se realiza un desglose en tres partidas: horas internas, amortizaciones y gastos. Finalmente, se hace un resumen con todas las partidas para conocer el coste total del proyecto.

En primer lugar, se detallan las horas internas del proyecto con objeto de determinar el coste del trabajo realizado por el personal. En él han participado un ingeniero senior, un ingeniero superior y un ingeniero junior.

Concepto	Coste unitario	Nº unidades	Coste
Ingeniero Senior	50 €/h	40 h	2.000,00 €
Ingeniero Superior	45 €/h	30 h	1.350,00 €
Ingeniero Junior	20 €/h	200 h	4.000,00 €
Subtotal HORAS INTERNAS			7.350,00 €

TABLA 2. HORAS INTERNAS

En segundo lugar, se encuentran las amortizaciones que se corresponden con los activos fijos que se utilizan durante la realización del estudio, como son el equipo informático, maquinaria y herramientas.

Concepto	Precio compra	Vida útil	Tiempo uso	Coste
Equipo informático				54,50 €
Ordenador	1.000,00 €	5 años	200 h	20,00 €
Licencias	3.000,00 €	1 año	23 h	34,50 €
Maquinaria				386,00 €
Centro <i>Laser Cladding</i>	250.000,00 €	10 años	20 h	250,00 €
Centro de fresado CNC Kondia	160.000,00 €	10 años	8 h	64,00 €
Centro de electroerosión ONA AX3	30.000,00 €	10 años	8 h	12,00 €
Pirómetro	5.000,00 €	5 años	80 h	40,00 €
Otras máquinas del taller	4.000,00 €	2 años	10 h	20,00 €
Herramientas				10,00 €
Herramientas taller	800,00 €	2 años	50 h	10,00 €
Subtotal AMORTIZACIONES				440,50 €

TABLA 3. AMORTIZACIONES

En tercer lugar, se tendrán en cuenta los gastos que hacen referencia a todo aquello que se utiliza para el proyecto como son piezas comerciales y materiales.

Concepto	Nº Unidades	Coste Unitario	Coste
Piezas comerciales			323,01 €
CXY1	1 pieza	165 €/pieza	165,21 €
SM1T2	1 pieza	19 €/pieza	19,01 €
SM1V15	1 pieza	33 €/pieza	32,50 €
SM1L30	1 pieza	25 €/pieza	24,57 €
SM1L40	1 pieza	42 €/pieza	41,72 €
Lente KPC031	1 pieza	40 €/pieza	40,00 €
Material			3.770,00 €
Aluminio	4 bloques	5 €/L	20,00 €
Argón	250 L	15 €/L	3.750,00 €
Subtotal GASTOS			4.093,01 €

TABLA 4. GASTOS

Finalmente, se presenta el coste total para llevar a cabo el proyecto. Además de considerar los gastos directos formados por las horas internas, amortizaciones y gastos, se incluyen también los gastos indirectos como un tanto por ciento de los gastos directos que contemplan todo aquello que no es imputable al proyecto.

Partida	Coste
Costes Diresctos	
Horas Internas	7.350,00 €
Amortizaciones	440,50 €
Gastos	4.093,01 €
Subtotal PROYECTO	11.883,51 €
Costes Indirectos	8% 950,68 €
TOTAL PROYECTO	12.834,19 €

TABLA 5. RESUMEN

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El principal objetivo de este proyecto es progresar en el ámbito de la monitorización del proceso *Laser Cladding*. Esto se debe a las perturbaciones presentes durante el proceso, las cuales pueden variar significativamente la calidad de la pieza.

En primer lugar, se desarrolló un nuevo soporte para el pirómetro y una pieza que sirviera de unión con la máquina. En ambos casos las piezas son de aluminio por su baja densidad, fácil maquinabilidad y por tratarse de un material que no se calienta en exceso. A su vez, con su diseño se buscaba aportar rigidez y evitar movimientos indeseados, al igual que la disminución de perturbaciones en los resultados debidas a reflejos ajenos a lo medido, hecho por el cual presenta una forma cerrada.

El pirómetro se colocó coaxial debido a que en estudios y ensayos realizados en trabajos previos, se determinó que dicha disposición aseguraba que la medida de la temperatura se toma en el baño fundido y con una mayor estabilidad. Hecho importante, al usarse la información registrada como señal de entrada a un sistema de control en lazo cerrado.

El sistema de control se encarga de adaptar la potencia del láser a los requerimientos de cada operación. Con ello se logra reducir las inestabilidades, manteniendo la temperatura constante para evitar daños en la pieza.

Dado que la fabricación aditiva suscita cada vez más interés tanto en la industria como en centros de investigación, cobra mayor relevancia el uso de un sistema de control durante el proceso para lograr piezas de alta calidad.

Para avanzar en esta línea de investigación, se debe continuar con el desarrollo del sistema de control para conseguir mejorar la estabilidad y por tanto, la repetibilidad y fiabilidad del proceso.

Asimismo, se podría mejorar el soporte del sensor de altura y proceder con su monitorización. Este dispositivo aporta información válida para mantener la boquilla a la distancia focal y ajustar la trayectoria de la misma.

Por todo ello, se puede considerar la integración de más sensores o sistemas de control que favorezcan la estabilidad del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour y Stephen Corbin, « Laser Cladding »
- [2] Reinhart Poprawe, « Tailored Light 2, Laser application Technology »
- [3] Collective of authors, IMPAC Infrared GmbH « Pyrometer-Handbook, Non-Contact Thermometry »
- [4] « Laser Cladding ». Centro tecnológico IK4-TEKNIKER
<http://www.tekniker.es/es/laser-cladding-o-laser-metal-deposition-lmd>
- [5] « Pirómetros, ¿Qué tipos de pirómetros láser existen? ». Compañía de instrumentación OMEGA Engineering.
<https://es.omega.com/prodinfo/pirometros.html>
- [6] Jorge Ignacio López Palomares. « Modificación superficial de aleaciones de titanio mediante plaqueado por láser de polvos con carburo de boro », Artículo.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76205/TFM_Jorge_Ignacio_L%C3%B3pez_Palomares.pdf?sequence=1
- [7] « Recuperación de alabes ». Centro tecnológico especializado en tecnologías de fabricación y producción industrial IK4-Ideko
<https://www.ideko.es/es/oferta-industria/casos-de-exito/iberia>
- [8] Eneko Ukar, Aitzol Lamikiz. « Fabricación aditiva: Qué es cada tecnología. », Artículo. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco UPV/EHU
<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138289-Fabricacion-aditivaQue-es-cada-tecnologia.html>
- [9] Rubén Lafuente. « La Fabricación Aditiva conduce a una nueva revolución industrial. »
http://www.tendencias21.net/La-Fabricacion-Aditiva-conduce-a-una-nueva-revolucionindustrial_a8558.html
- [10] « Impac Pyrometer IGAR 12-LO ». Luma Sense Technologies an Advanced Energy Company
<https://www.lumasenseinc.com/EN/products/temperature-measurement/infrared-thermometers/impac-pyrometers/series-12/pyrometer-impac-igar-12-lo.html>

ANEXOS

Anexo I: Datos técnicos del pirómetro



IMPAC Infrared Thermometers

Digital 2-color IMPAC pyrometer with fiber optic for non-contact temperature measurement on metals, ceramics, graphite etc. between 300 and 3300 °C

ISR 12-LO • IGAR 12-LO

- Extremely fast exposure time
- Very small spot sizes
- Highest accuracy
- Built-in lens contamination control system
- 2-color- / mono- / metal mode (switchable)
- Built-in laser targeting light
- All parameters adjustable at the instrument
- Output 0 - 20 mA or 4 - 20 mA (switchable)
- Interface RS232 / RS485 (switchable)
- Test current output for diagnostics



The pyrometers ISR 12-LO and IGAR 12-LO are digital, highly accurate 2-color pyrometers with fiber optic for non-contact temperature measurement.

The pyrometers measure in the 2-color principle in which two adjacent wavelengths are used to calculate the temperature. This technique offers the following advantages compared with the standard one-color pyrometers:

- The temperature measurement is independent of the emissivity of the object in wide ranges
- The measuring object can be smaller than the spot size
- Measurements are unaffected by dust and other contaminants in the field of view or by dirty viewing windows

Additionally, the pyrometers can be switched to 1-color mode and used like a conventional pyrometer. The metal mode allows measurements of metals and alloys with unknown K-factor (emissivity slope).

Optical head and fiber can be used in very high ambient temperatures up to 250 °C without cooling and they are unaffected by electromagnetic interferences.


The very short response time of only 2 ms facilitates the measurement of fastest heating processes.

You can setup the pyrometer as well as view and store the temperature on a PC using serial interface and the provided software InfraWin.

Typical Applications

- Induction heating
- Welding
- Casting
- Forging
- Annealing
- Sintering
- Rolling Mill
- Rotary Kilns
- Pouring Stream
- Research and Development
- Laser Applications

Technical Data

Measurement Specifications		Communication / Interface	
Temperature Ranges:	ISR 12-LO: 600...1300 °C (MB 13) 750...1800 °C (MB 18) 900...2500 °C (MB 25) 1000...3300 °C (MB 33)	Analog Output: 0 to 20 or 4 to 20 mA switchable, load 0 to 500 Ohm Test current 10 mA for inspection of wiring and connected instruments	
	IGAR 12-LO: 300...1000 °C (MB 10) 350...1300 °C (MB 13) 450...1700 °C (MB 17) 500...2200 °C (MB 22) 550...2500 °C (MB 25)	Interfaces: Switchable: RS232 or RS485 addressable, half duplex; baud rate 2.4 up to 115.2 kBd	
Sub Range:	Any range adjustable within the temperature range, min. span 51 °C	Display: Built-in 4-digit 7-segment LED, height 13 mm; LED for °C / °F, clear mode "auto", "ext", ratio- (2-color-) / mono- / metal mode	
Spectral Ranges:	ISR 12-LO: Channel 1: 0.8 µm Channel 2: 1.05 µm IGAR 12-LO MB 10: Channel 1: 1.52 µm Channel 2: 1.64 µm All other MB: Channel 1: 1.28 µm Channel 2: 1.65 µm	Control Panel: 4 keys, switch for interface, key for test current Parameters: Adjustable at the instrument or via serial interface: Emissivity ϵ , Emissivity slope K, response time t_{90} , clear times t_{clear} for maximum value storage, automatic or external deletion of the maximum value storage, setting of ratio- / mono- / metal mode, switch-off limit, analog output 0 to 20 or 4 to 20 mA, Temperature sub range, address, baud rate, Temperature display in °C / °F	
Resolution:	Display: 1 °C Interface: 0.1 °C Analog output: < 0.025% of adjusted temperature range	Electrical	
Accuracy:	ISR 12-LO: 0.4% of reading in °C + 1 °C (< 1500 °C) 0.6% of reading in °C + 1 °C (> 1500 °C) IGAR 12-LO: 0.5% of reading in °C + 1 °C (< 1500 °C) 0.7% of reading in °C + 1 °C (> 1500 °C)	Power Supply: 24 V DC (15 to 40 V DC) or 24 V AC (12 to 30 V AC), 48 to 62 Hz	
Repeatability:	ISR 12-LO: 0.2% of reading in °C + 1 °C IGAR 12-LO: 0.3% of reading in °C + 1 °C	Current Consumption: Max. 600 mA	
Signal Processing:	Photo current, digitized immediately	Isolation: Power supply, analog output and digital interface are galvanically isolated against each other	
Emissivity Slope K:	ϵ_1/ϵ_2 : 0.800 to 1.200 adjustable in steps of 0.001	Switch Contact: Max. 0.15 A	
Emissivity ϵ :	0.1 to 1 adjustable in steps of 0.001	Environmental	
Measuring Modes:	Adjustable: ratio- (2-color-) / mono- / metal mode, switchable	Operating Temperature: At the converter housing: 0 to 60 °C (ISR 12-LO); 0 to 50 °C (IGAR 12-LO)	
Switch-off Limit:	2% - 50% in 1% steps	Storage Temperature: -20 to 70 °C	
Exposure Time t_{exp} :	2 ms (with dynamical adaption at low signal levels), adjustable up to 10 s	Relative Humidity: Non condensing conditions	
Maximum Value Storage:	Built-in single or double storage. Cleared by preselected time interval t_{clear} (off: 0.01 s; 0.05 s; 0.25 s; 1 s; 5 s; 25 s) or extern or automatically with the next measuring object	Weight: Converter: 2.2 kg; optical head II: 140 g fiber (2.5 m): 250 g	
Sighting System:	Laser targeting (max. power level < 1 mW, $\lambda = 630-680$ nm, CDRH class II)	Protection System: IP65 (according to DIN 40 050)	
		CE-label: According to EU directives about electromagnetic immunity	
		Note: The calibration / adjustment of this pyrometer is carried out in accordance with VDI/VDE 3511, Part 4.4. See http://info.kumasensinc.com/ calibration for more information.	

Fiber Optic

The radiation, coming in through the optical head, is transported via the lens system into the mono glass fiber with flexible stainless steel protection tube where it is transmitted along to the converter. As the optical head contains only the lens system and the sensor and the electronics are located in the converter box, fiber and optical head can withstand ambient temperatures up to 250 °C without cooling. Depending on the measuring range 2 different fibers are used. They are marked red or blue.

Length:	2.5 m, 5 m, 7.5 m, 10 m, 15 m, 30 m on request
Color mark at the fiber:	Blue: ISR 12-LO, MB 13; IGAR 12-LO, MB 10 Red: ISR 12-LO, MB 18, 25, 33; IGAR 12-LO MB 13, 17, 22, 25
Max ambient temperature:	Max 250 °C (instrument's side with color mark: max 125 °C)
Minimum bending radius:	Blue: 100 mm for short time, 300 mm permanently Red: 50 mm for short time, 120 mm permanently

Optical Head

Depending on the application the instrument will be delivered with a small or a large optical head. The selection of the optical head depends not only on its size but also on the required spot size (size of the measuring object) and the measuring distance.

Optical head I:

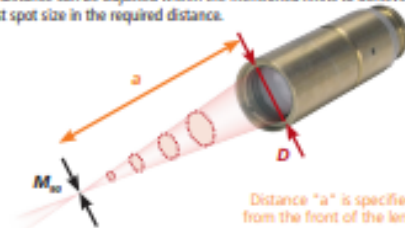
With the very small dimensions the optical head I is suited for use in confined spaces. The optics is adjusted to one of the measuring distances mentioned in the table. The mentioned spot size will be achieved in exactly this distance (other distances on request).




Optical head II:

The optics II is bigger, but smaller spot sizes can be achieved. Two designs are available, fixed adjusted or focusable:

Similar to optics I the fixed adjusted type is adjusted to one of the measuring distances mentioned in the table (other distances on request).

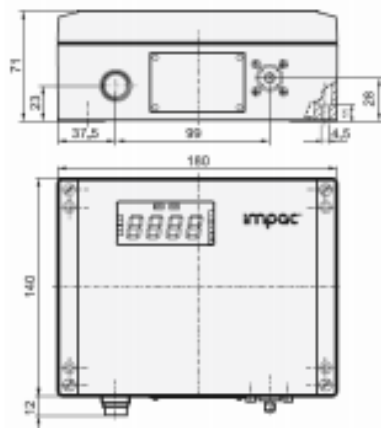
The focusable type is available for 6 different distance ranges. Each measuring distance can be adjusted within the mentioned limits to achieve the smallest spot size in the required distance.



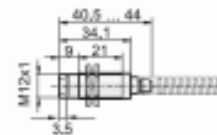
Optical Head	Measuring distance a (mm)	Spot size M_{90} [mm]		Aperture D [mm]
		ISR 12-LO: MB 13 IGAR 12-LO: MB 10	ISR 12-LO: MB 18, 25, 33 IGAR 12-LO: MB 13, 17, 22, 25	
Optical head I: 	Adjusted to: 120	2.2	1.2	7
	Adjusted to: 260	5	2.6	7
	Adjusted to: 700	14	7.2	7
Optical head II: (fixed adjusted) 	Adjusted to: 87	0.75	0.45	17
	Adjusted to: 200	1.5	0.8	17
	Adjusted to: 600	5.3	2.7	15
	Adjusted to: 4500	42	22	15
Optical head II: (focusable) 	Range: 88 ... 110	0.8 ... 1.1	0.45 ... 0.6	17
	Range: 95 ... 129	0.9 ... 1.3	0.5 ... 0.75	16
	Range: 105 ... 161	1.1 ... 1.7	0.6 ... 1	15
	Range: 200 ... 346	1.5 ... 2.8	0.8 ... 1.5	17
	Range: 247 ... 606	2.0 ... 5.2	1.1 ... 2.7	16
	Range: 340 ... 4500	2.8 ... 42	1.5 ... 22	15

Dimensions

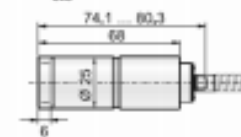
Converter:



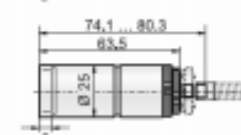
Optical head type I:



Optical head type II: (fixed adjusted)

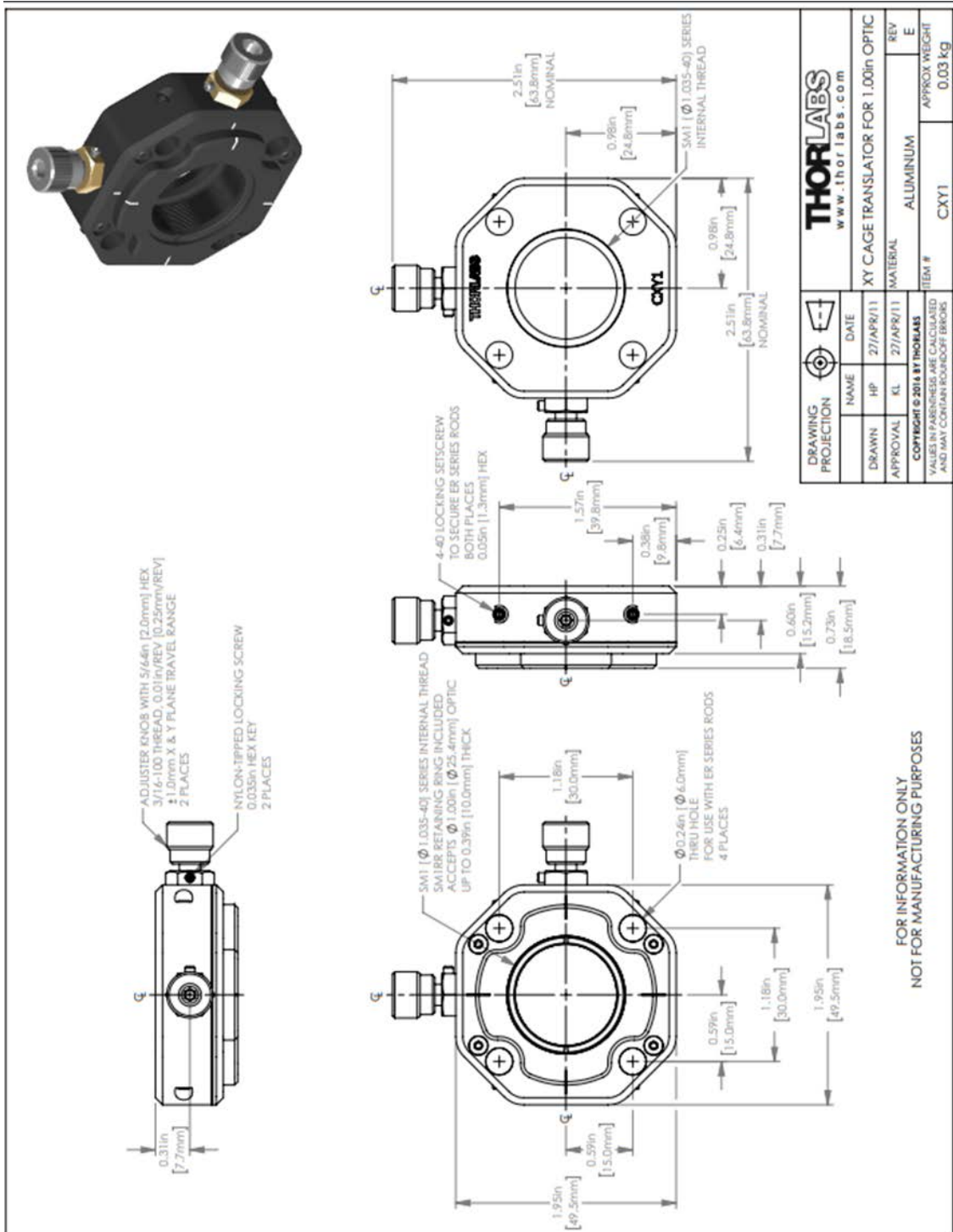


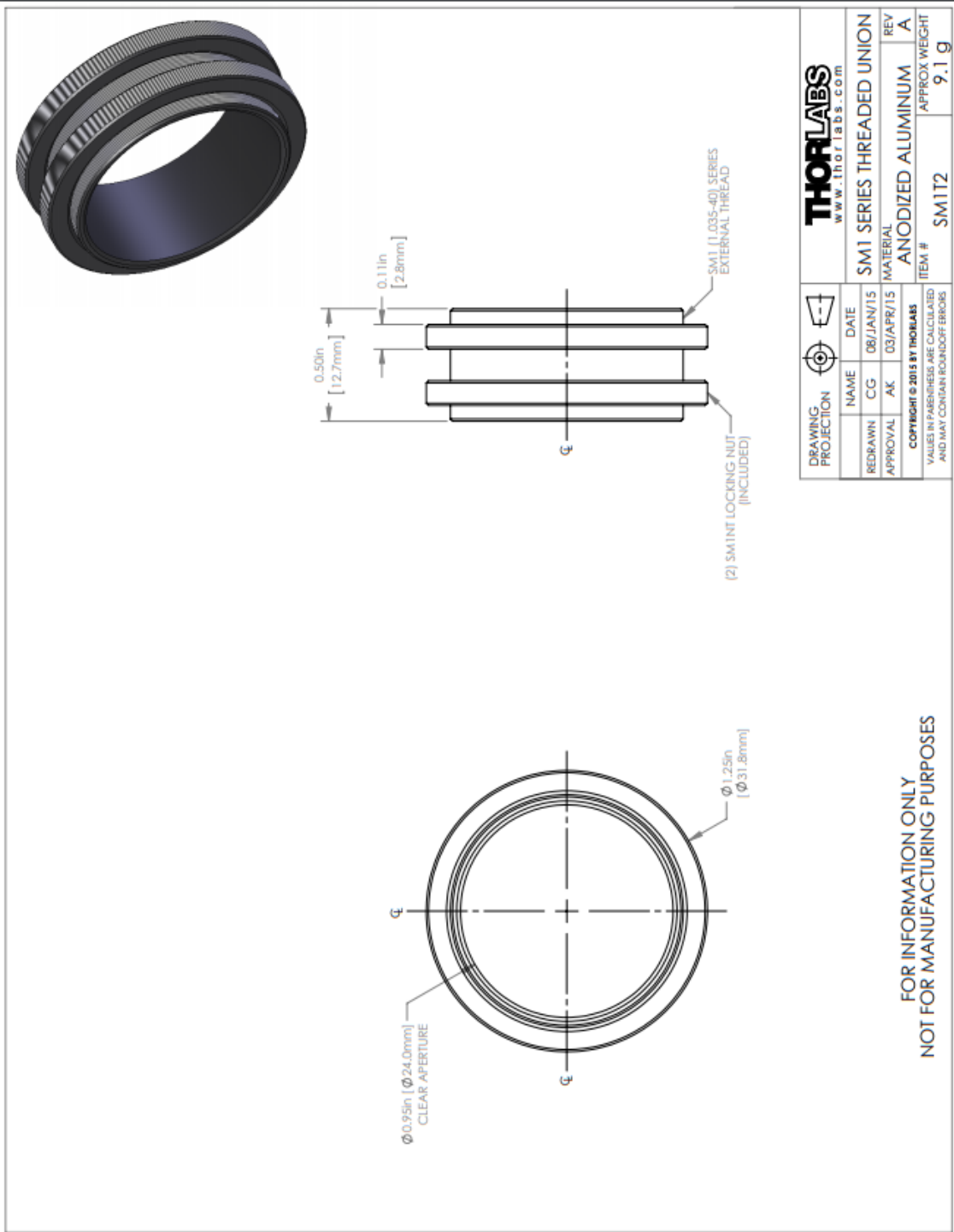
Optical head type II: (focusable)

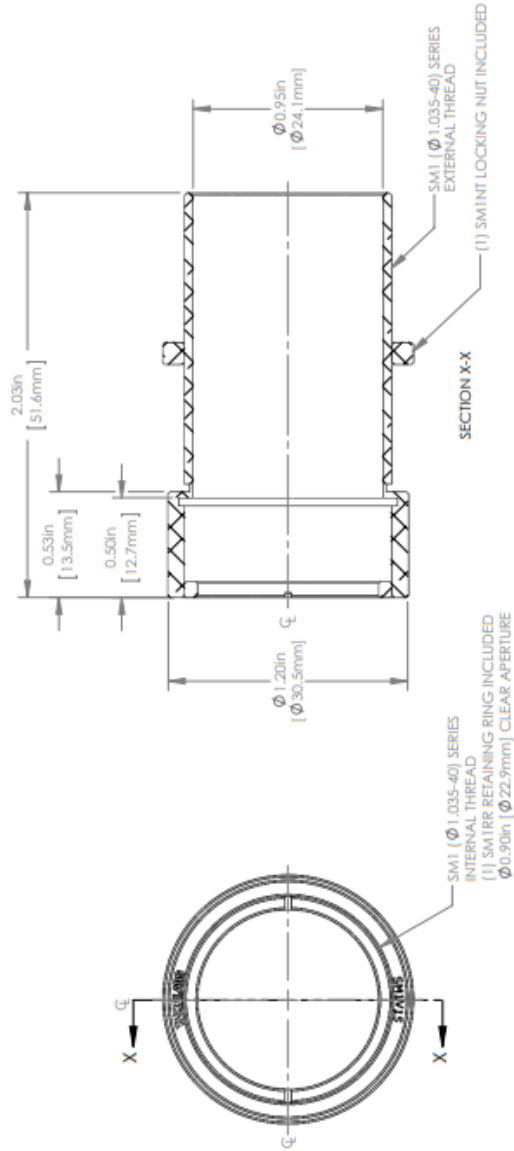


All dimensions in mm

Anexo II: Piezas soporte del sistema óptico del pirómetro

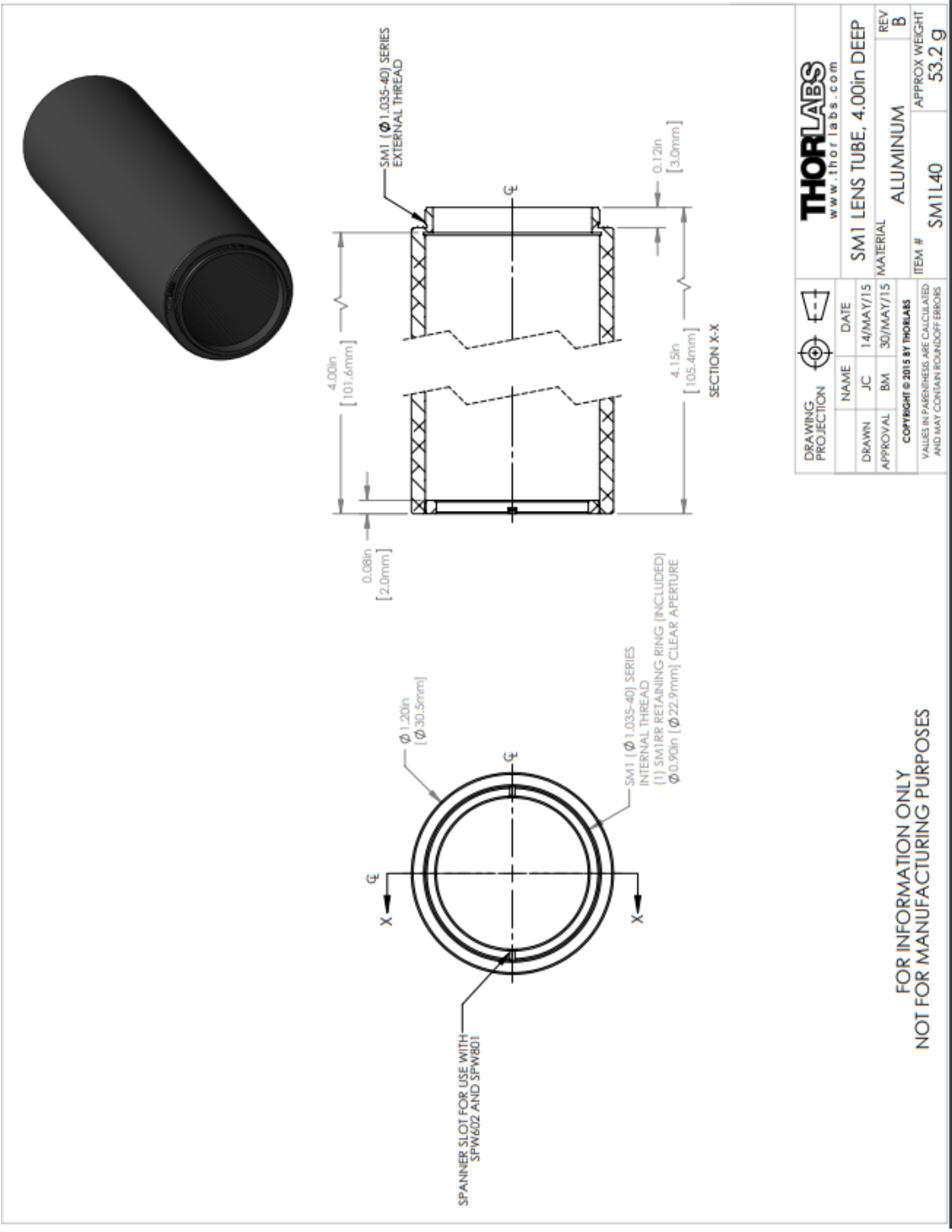






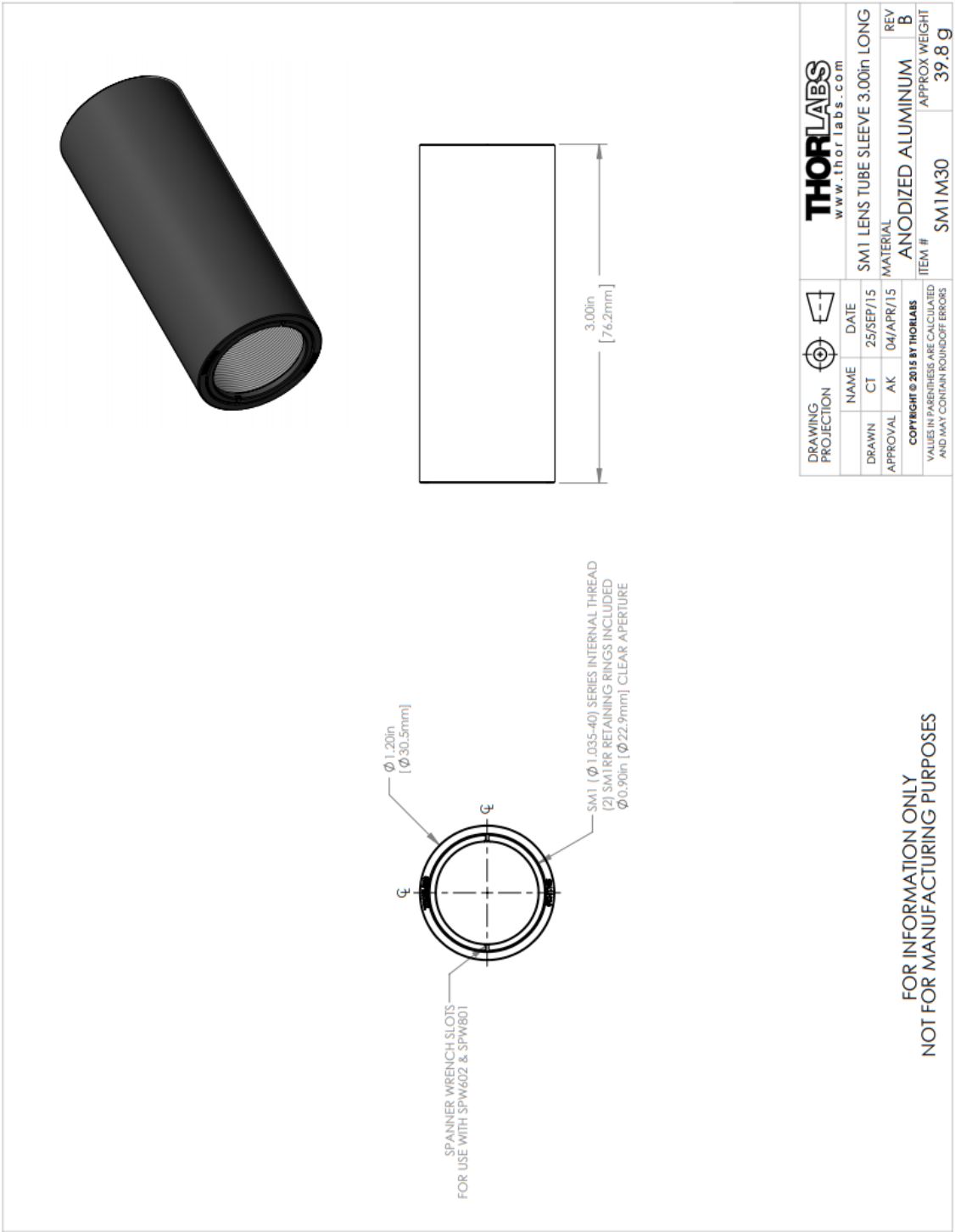
		THORLABS www.thorlabs.com	
NAME	DATE	SM1 ROTATING LENS TUBE, 1.5" LONG	
DRAWN CT	05/FEB/16	MATERIAL	ALUMINIUM
APPROVAL AK	05/FEB/16	ITEM #	SM1V15
COPYRIGHT © 2016 BY THORLABS VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND-OFF ERRORS		REV	A
		APPROX WEIGHT	17.9 g

FOR INFORMATION ONLY
 NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES



DRAWING PROJECTION		THORLABS www.thorlabs.com	
NAME	DATE	SM1 LENS TUBE, 4.00in DEEP	
DRAWN JC	14/MAY/15	MATERIAL	ALUMINIUM
APPROVAL BM	30/MAY/15	REV	B
COPYRIGHT © 2015 BY THORLABS		ITEM #	SM1L40
VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND-OFF ERRORS		APPROX WEIGHT	53.2 g

FOR INFORMATION ONLY
 NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES



Anexo III: Pieza de unión entre soporte y máquina

