

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## INTEGRACIÓN DE SENSORES EN ÚTILES DE TROQUELERÍA MEDIANTE APOORTE POR LÁSER

**Estudiante:** Aperribai Urkidi, Mikel  
**Director:** Lamikiz Mentxaka, Aitzol  
**Departamento:** Mecánica  
**Curso académico:** 2020-2021

Bilbao, 7 de septiembre de 2021



## DATOS BASICOS DEL PROYECTO

**Alumno:** Mikel Aperribai Urkidi

**Director Técnico:** Aitzol Lamikiz Mentxaka

**Departamento:** Ingeniería Mecánica

**Título del proyecto:** Integración de sensores en útiles de troquelería mediante aporte por láser.

**Plazo de ejecución:** 05/10/2020 a 28/05/2021

**Laburpena:** Beroko estanzazio prozesua, lehenago ber kristalizazio tenperatura baino gehiagora berotutako metal baten deformazioan basatutako fabrikazio teknologia bat da. Trokelak, tresna bezala erabiliak, fabrikazio konplexuko eta balio erantsi altuko pieza dira eta bertan tenperatura sentsoreak integratzea prozesu konplexua suposatzen du. Trokelaria moldeetan sentsoare integratzea ea bideragarria den aztertzea da helburua, edozein zatiren funtzionamendua larritu gabe, beraien integritate metalurgikoa bermatuz, momentuko tenperatura parametroak neurtzeko estanzazio prozesuan. Horretarako, laser prozesu gehigarria (LMD) erabiltzea proposatzen da, kasu honetan izandako materialekin eta gainazal konplexuekin lan egiteko teknologia egokia delako.

**Hitz gakoak:** Laser, fabrikazio gehigarria, trokel, beroko estanzazioa, sentsoare.

**Resumen:** El proceso de estampación en caliente es una tecnología de fabricación basada en la deformación de un metal calentado previamente hasta temperaturas que superen su temperatura de recristalización. Los troqueles utilizados como herramientas, son piezas de fabricación compleja y alto valor añadido, en las cuales la integración de sensores de temperatura supone un proceso complejo. Se pretende estudiar la viabilidad de integración de sensores en moldes de troquelería sin perjudicar el funcionamiento de ninguna de las dos partes garantizando su integridad metalúrgica, para medir en tiempo real parámetros de temperatura durante el proceso de estampación. Para ello se plantea utilizar tecnología de aporte por láser (LMD) debido a las características idóneas de esta tecnología para trabajar con las superficies complejas y materiales disponibles.

**Palabras clave:** Láser, fabricación aditiva, troquel, estampación en caliente, sensor.

**Abstract:** The hot stamping process is a manufacturing technology based on deform a previously up to recrystallization temperature heated metal. The dies used as tools, are a complex fabrication an elevated add value pieces, in which temperature sensor integration is not an easy task. The intention is to study the viability of the integration of sensors in dies, without harming any of both parts, to measure in real time temperature parameters during the hot stamping process. For that, it is proposed to use the laser metal deposition (LMD) technology due to its suitable characteristics for complex surfaces and available material working.

**Keywords:** Laser, additive manufacturing, die, hot stamping, sensor.

# Índice

1.	Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos .....	6
1.1	Tablas.....	6
1.2	Ilustraciones .....	6
1.3	Acrónimos.....	9
2.	Introducción.....	10
3.	Contexto.....	12
4.	Objetivos y alcance del trabajo.....	14
4.1	Objetivos .....	14
4.2	Alcance .....	15
5.	Descripción de requerimientos y análisis del estado del arte.....	16
5.1	Estampación en caliente .....	16
5.2	Sensores de temperatura.....	18
5.3	Tecnologías láser .....	19
5.4	Laser Metal Deposition o LMD .....	26
5.5	Descripción de equipos y materias primas necesarias.....	30
6.	Metodología .....	51
6.1	Planificación .....	52
6.2	Preparación previa a los ensayos de integración I .....	53
6.3	Ensayos de integración de cables con aislamiento mineral I .....	55
6.4	Obtención de resultados I .....	57
6.5	Planificación II.....	57
6.6	Ensayos de parametrización y caracterización del material .....	60
6.7	Obtención de resultados II .....	61
6.8	Ensayos de integración de cables con aislamiento mineral II .....	62
6.9	Obtención de resultados III .....	63
6.10	Ensayos de integración del termopar.....	63
7.	Resultados .....	66
7.1	Resultados ensayos de integración I .....	66
7.2	Resultados ensayos de parametrización y caracterización del material.....	71
7.3	Resultados ensayos de integración II .....	76
7.4	Resultados ensayos de integración del termopar .....	79
8.	Descripción de tareas. Diagrama Gantt.....	82
8.1	Descripción de tareas .....	82
8.2	Diagrama Gantt .....	85

9. Aspectos económicos .....	86
10. Análisis de riesgos.....	89
10.1 Análisis de riesgo de objetivos .....	89
10.2 Análisis de riesgo en máquinas y prevención.....	90
10.3 Análisis de riesgo de los materiales y su prevención .....	91
11. Discusión y conclusiones.....	92
11.1 Discusión .....	92
11.2 Conclusiones.....	93
12. Bibliografía.....	95

# 1. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos

## 1.1 Tablas

Tabla 1. Composición química del acero en polvo AISI H13.....	41
Tabla 2. Composiciones químicas del acero de herramientas AISI H11 y acero inoxidable AISI 316. ....	41
Tabla 3. Parámetros de aporte y caracterización geométrica de cordones únicos.....	53
Tabla 4. Parámetros de aporte para ensayos sobre tubo de AISI 316.....	54
Tabla 5. Parámetros de aporte de las estrategias 1 y 2.....	56
Tabla 6. Cálculo de solape real para cada caso. ....	58
Tabla 7. Parámetros de aporte para los ensayos de caracterización de los monocordones .	61
Tabla 8. Parámetros de recubrimiento del cable de diámetro Ø4,5 mm. ....	62
Tabla 9. Parámetros de recubrimiento del cable de diámetro Ø3 mm. ....	63

## 1.2 Ilustraciones

Ilustración 1. Obtención de piezas de automoción mediante estampación en frío. ....	16
Ilustración 2. Etapas de la estampación en caliente. ....	17
Ilustración 3. Troqueles de estampación. ....	17
Ilustración 4. Conectividad inalámbrica de la máquina. ....	18
Ilustración 5. Sensores de presión y sensores de temperatura.....	19
Ilustración 6. Funcionamiento de un termopar. ....	19
Ilustración 7. Generación del láser. ....	20
Ilustración 8. Espectro electromagnético. ....	20
Ilustración 9. Coherencia del láser.....	21
Ilustración 10. Generación del haz láser.....	21
Ilustración 11. Soldadura por láser. ....	23
Ilustración 12. Esquema de corte por láser.....	23
Ilustración 13. Corte por láser.....	24
Ilustración 14. Superficie texturizada por láser. ....	24
Ilustración 15. Marcado láser.....	25
Ilustración 16. Superficie pulida por láser. ....	25
Ilustración 17. Esquema de pulido láser. ....	26
Ilustración 18. Laser Metal Deposition. ....	27
Ilustración 19. Selective Laser Melting. ....	27
Ilustración 20. Etapas de un turborreactor.....	29
Ilustración 21. Troqueles de estampación en caliente. ....	29

Ilustración 22. Generador láser Rofin FL010. ....	31
Ilustración 23. Recorrido del láser. ....	32
Ilustración 24. Generador láser TruDisk 3001. ....	32
Ilustración 25. Disposición de fibra óptica variable. ....	33
Ilustración 26. Proceso de fusión por láser. ....	33
Ilustración 27. Equipo de refrigeración. ....	34
Ilustración 28. Centro de procesamiento láser. ....	35
Ilustración 29. Mesa de posicionamiento con inclinación. ....	35
Ilustración 30. Centro de procesamiento TruLaser Cell 3000. ....	36
Ilustración 31. Boquilla coaxial. ....	37
Ilustración 32. Boquilla con inyectores. ....	38
Ilustración 33. Ventajas y desventajas de la boquilla con inyectores. ....	39
Ilustración 34. Bombonas de gas Argón. ....	39
Ilustración 35. Alimentadores de polvo. ....	40
Ilustración 36. Sierra metalográfica. ....	42
Ilustración 37. Disco de corte FS-D 300A. ....	43
Ilustración 38. Encapsuladora. ....	43
Ilustración 39. Proceso de encapsulado de secciones. ....	44
Ilustración 40. Pulidora. ....	45
Ilustración 41. Lijas de diamante. ....	46
Ilustración 42. Paños y sprays de diamante. ....	47
Ilustración 43. Materiales utilizados en el proceso de ataque químico. ....	48
Ilustración 44. Microscopio Leica DCM 3D. ....	49
Ilustración 45. Escuela de Ingeniería de Bilbao UPV/EHU. ....	52
Ilustración 46. Diagrama de flujo I. ....	53
Ilustración 47. Solape óptimo y resultados obtenidos de los ensayos. ....	54
Ilustración 48. Caracterización geométrica de los cordones de AISI H13 sobre sustrato tubular de AISI 316. ....	55
Ilustración 49. Ensayos preliminares realizados. ....	55
Ilustración 50. Estrategia de aporte empleada. ....	56
Ilustración 51. Cálculos realizados por el programa de trayectorias. ....	58
Ilustración 52. Representación gráfica del error de solape cometido en la programación de trayectorias. ....	59
Ilustración 53. Diagrama de flujo II. ....	60

Ilustración 54. Cortes de los monocordones de diámetro Ø4,5 mm y Ø3 mm. ....	61
Ilustración 55. Termopar a integrar.....	63
Ilustración 56. Estrategia de aporte para la integración del termopar. ....	65
Ilustración 57. Ensayos realizados en base a la estrategia 1.....	66
Ilustración 58. Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte.....	67
Ilustración 59. Grieta en la zona superior del cable de diámetro Ø8.....	67
Ilustración 60. Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte.....	68
Ilustración 61. Zonas críticas de gran penetración en la cubierta. ....	68
Ilustración 62. Faltas de fusión debidas a un solape insuficiente.....	68
Ilustración 63. Vista general de los aportes realizados sobre los cables de diámetro Ø4,5 mm y Ø3 mm.....	69
Ilustración 64. Cables de diámetro Ø8 mm aportados con las estrategias 1 y 2. ....	70
Ilustración 65. Zonas críticas de penetración insuficiente.....	70
Ilustración 66. Cables de diámetro Ø6 mm aportados con las estrategias 1 y 2. ....	71
Ilustración 67. Análisis de los aportes en cables de diámetro Ø4,5 mm. ....	72
Ilustración 68. Mediciones del cordón número 4.....	73
Ilustración 69: Microestructura del cordón número 4. ....	73
Ilustración 70: Análisis de los aportes en cables de diámetro Ø3 mm.....	74
Ilustración 71: Mediciones del cordón número 1.....	75
Ilustración 72: Mediciones del cordón número 2.....	75
Ilustración 73: Microestructura de los cordones número 1 y 2. ....	76
Ilustración 74. Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte.....	77
Ilustración 75. Análisis de la unión entre aporte y cubierta. ....	78
Ilustración 76: Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte.....	78
Ilustración 77: Análisis de la unión entre aporte y cubierta. ....	79
Ilustración 78. Termopar integrado en el sustrato.....	80
Ilustración 79. Defectos en la integración del termopar I. ....	80
Ilustración 80. Defectos en la integración del termopar II. ....	81



### 1.3 Acrónimos

LMD: Método de aporte por láser

LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.*

SLM: Fusión selectiva con láser (*Selective Laser Melting*).

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

CAM: Fabricación asistida por ordenador (*Computer-Aided Manufacturing*).

LBW: Soldadura por haz láser (*Laser-Beam Welding*).

LBC: Corte por láser (*Laser-Beam Cutting*).

CFAA: Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica.

## 2. Introducción

Dentro del ámbito industrial, una de las maneras más comunes de trabajar con materiales metálicos implica la aplicación de diversos grados de presión. El proceso de estampación en caliente puede ser definido de esta forma, ya que trata de ejercer una fuerza considerable en distintas áreas del material y moldearlo según los requisitos establecidos. La estampación en caliente tiene en cuenta el previo calentamiento del material a deformar, llegando a temperaturas superiores a la temperatura de recristalización del material y la posterior deformación sobre la pieza mediante troqueles. Mediante este proceso de estampación, se logran unas piezas con mayores deformaciones que con la estampación en frío, por otro lado, las altas temperaturas alcanzadas en el transcurso de la operación son críticas para los útiles empleados en la deformación ya que se pueden producir defectos en los moldes o un deterioro prematuro de los mismos.

Con el fin de controlar los parámetros de interés se produce la necesidad de emplear instrumentos que permitan monitorizar estos parámetros. En el caso de la industria de los moldes y matrices, el control de la presión y de la temperatura es de vital importancia, ya que son parámetros críticos que definen la vida útil de estos elementos, así como también las propiedades de los componentes fabricados.

Hoy en día, el empleo de sensores de diversa naturaleza está ampliamente extendido en la industria. Sin embargo, su uso está limitado a superficies de fácil acceso, de forma que su instalación no sea complicada. En el caso de la sensorización de troqueles, esta solución no es válida ya que la zona crítica a sensorizar está situada en una zona inaccesible, de forma que queda impedida la detección de fallos en las zonas más comprometidas. Por eso ha surgido la idea de sensores embebidos o integrados en los propios troqueles, haciendo posible la medición de los parámetros de interés en zonas comprometidas del utillaje durante el proceso de deformación, siendo los sensores parte de las herramientas de estampación.

La idea de integrar sensores en el utillaje es una idea innovadora al igual que complicada, ya que es necesario diseñar una metodología que permita la integración de los mismos asegurando una correcta conectividad entre estos y el sistema de control, y que además no dañe ni debilite el componente en sí mismo.

La fabricación aditiva y, en particular el aporte por láser o LMD, ha demostrado en repetidas ocasiones su idoneidad para el procesado de aceros muy utilizados en la industria de moldes y matrices, por ejemplo, los aceros de herramientas de trabajo en caliente como AISI H13 (1.2344) o el AISI H11 (1.2343). Este proceso consiste en fundir material metálico depositado sobre una superficie, con parte del sustrato o material sobre el que se deposita el metal mediante un láser que concentra una cantidad de energía en un punto que posibilita esa fusión entre ambos materiales. El gran control del aporte energético durante el proceso, la reducida zona afectada térmicamente y su libertad geométrica, demuestran un gran potencial para la integración de sensores en moldes y matrices y, en particular, en troqueles de estampación en caliente. Además, la reparación y el recubrimiento de utillajes de alto valor añadido por medio de LMD, están completamente instaurados en la industria de moldes y matrices.

Es por esto que, teniendo en cuenta la importancia de la constante medición y monitorización de los parámetros necesario en los procesos de fabricación avanzada de piezas de alto valor

añadido, la continua mejora y búsqueda de optimización de procesos de producción, los componentes electrónicos de medición de los que se dispone hoy en día y la disposición de tecnologías relativamente nuevas como el *Laser Metal Deposition* (LMD), dan pie a este proyecto que pretende evaluar la viabilidad de la integración de sensores de temperatura en troqueles. La finalidad principal de este proyecto, es la obtención de parámetros de aporte adecuados que permitan integrar sensores en troqueles, sin perjudicar el funcionamiento de ninguno de los dos y garantizando una integridad y continuidad estructural entre ambos mediante la tecnología de aporte por láser. Esto quiere decir, que el sensor debe quedar adherido a la superficie del molde, proporcionando una unión uniforme entre ambas superficies, exenta de poros o grietas y sin penetrar la vaina protectora del sensor debido al exceso de energía concentrada en la fina capa que cubre el dispositivo.

Para ello, se realizarán pruebas de caracterización del material a aportar para configurar una ventana de parámetros adecuados para aportar AISI H13 sobre AISI H11. También pruebas de parametrización que permitan definir una configuración de parámetros de la máquina de aporte láser con valores óptimos para realizar el proceso. Junto a la parametrización también se tiene que tener en cuenta la estrategia de aporte para determinar si el proceso de aporte de energía es válido, por eso, se propondrán diferentes estrategias alternativas para el caso de integración de sensores de diferente tamaño.

### 3. Contexto

Durante la última década, la medición, control y monitorización en tiempo real de parámetros decisivos ha tomado una gran importancia en el mundo de la industria de la fabricación, siendo parte de la denominada industria 4.0. Para la medición de estos datos, se dispone de diferentes tipos de sensores, dependiendo del parámetro que se quiera medir, situados en la propia máquina donde se está realizando el proceso correspondiente. Mediante dispositivos que muestran los datos medidos o incluso conectando las máquinas de producción a ordenadores donde se pueden visualizar y controlar los parámetros, se tiene un constante conocimiento del proceso que se está llevando a cabo, pudiendo predecir errores y optimizar procesos de producción.

La rápida evolución de los sistemas informáticos hace que estos sistemas de medición y monitorización se extiendan a una gran cantidad de procesos de fabricación, siendo muy complejo instalar sensores para la medición de datos sin comprometer el propio proceso de fabricación en algunos casos. Junto a esta expansión, también juega un papel decisivo la mejora continua en el diseño y procesos de fabricación forzados por la creación de piezas cada vez más complejas, exigentes y de alto valor añadido.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, suscita un gran interés la integración de sensores en el propio utillaje del proceso de estampación en caliente. En este proceso es muy importante saber lo que sucede dentro de los troqueles a lo largo del proceso de deformación a altas temperaturas que se da, para controlar ciertos parámetros que influyen en la fabricación de piezas. Esta integración de sensores en troqueles provoca la necesidad de perfeccionar la fabricación de los troqueles, realizando una mayor inversión para su diseño y fabricación con el objetivo de obtener unos mejores resultados en el proceso de estampación y a su vez aumentar la vida útil de los mismos.

Para solucionar el problema de introducir sensores en troqueles, se opta por la tecnología de aporte por láser o LMD, que es un método idóneo para trabajar sobre superficies complejas y los materiales de acero de herramientas utilizados en el ámbito de la troquelaría están ampliamente extendidos en procesos de aporte por láser. Además, esta tecnología es particularmente útil en este caso debido a la posibilidad de control del aporte energético y la reducida zona afectada térmicamente, que debido a la complejidad geométrica a la que hay que hacer frente y los requisitos mecánicos necesarios en los troqueles de estampación en caliente, son factores decisivos a tener en cuenta.



## 4. Objetivos y alcance del trabajo

### 4.1 Objetivos

El objetivo de este proyecto, es el estudio y evaluación de la integrabilidad de sensores de temperatura, como pueden ser los termopares, en troqueles mediante tecnología de aporte por láser o LMD.

Los parámetros de aporte juegan un papel crítico en el proceso de integración del sensor, ya que deben cumplir ciertas especificaciones requeridas para una unión válida con el troquel o en este caso el sustrato con el que se va a fundir el material.

- En el presente estudio, se emplearán materiales comúnmente utilizados en la industria de la troquelería como son los aceros de herramientas de trabajo en caliente AISI H13 y AISI H11. Dichos materiales son previamente seleccionados en base al estudio bibliográfico de los materiales utilizados en este ámbito de la industria de la fabricación.
- Los parámetros a utilizar a la hora de establecer la cantidad de energía aportada mediante el láser, es decir, para el aporte de un material sobre otro, son los utilizados para aportes en chapa fina de espesores menores a 10 mm, obtenidos del estudio bibliográfico referente a varios estudios sobre aporte en chapa fina.
- Para definir una correcta parametrización para la integración de los sensores, primero se realizará una caracterización del material, analizando los diferentes resultados obtenidos en las diversas condiciones de aporte, creando así una ventana de parámetros válida para su posterior aplicación sobre el sensor. Posteriormente, se realizarán ensayos de integración de sensores teniendo en cuenta dichos parámetros.
- Con este trabajo, se pretenden determinar los parámetros válidos de aporte en sensores de diferente diámetro, buscando un buen recubrimiento que no dañe la integridad estructural del mismo y eludir la aparición de defectos como grietas o poros a lo largo de su unión con el sustrato.

El estudio “Integración de sensores en útiles de troquelería mediante aporte por láser” tiene como objetivo determinar los parámetros óptimos de aporte y el diámetro mínimo del termopar integrable mediante esta tecnología.

## 4.2 Alcance

Una vez acordados los objetivos a seguir a lo largo del proyecto, se procede a la creación y desarrollo de las estrategias a seguir para cumplir con éxito los objetivos acordados en el plazo establecido.

Como punto de partida del proyecto, se realiza un exhaustivo estudio bibliográfico en referencia a materiales de herramientas de estampación en caliente, haciendo especial hincapié en los aceros, estrategias de aporte láser en chapa fina y parámetros adecuados y documentación de sensores de temperatura como pueden ser los termopares.

Basándose en la información obtenida por artículos internos y externos y a la experiencia en ensayos previos en los que los materiales utilizados eran similares, se realiza una selección de parámetros para realizar la integración del sensor.

Previo a la integración total del sensor en el sustrato, se realizan unos ensayos de caracterización del material y comprobación de los parámetros seleccionados, comprobando que estos cumplan las condiciones de integridad metalúrgica que requieren los aportes para que sean válidos.

Tras la caracterización y parametrización del material se procede al recubrimiento de sensores de diferente tamaño, especialmente en los de menor diámetro ya que suponen un mayor reto debido a sus menores dimensiones. Si esta prueba es exitosa, es decir, no se localizan penetraciones en el sensor y hay ausencia de grietas o poros en la fusión de ambos materiales proporcionando una buena unión, se procederá al recubrimiento final de los sensores en la pieza demostradora.

En cada paso o set de ensayos a lo largo del proyecto, se analizan los resultados obtenidos creando unas probetas con las zonas de interés a analizar previamente cortadas con una sierra metalúrgica. Tras cortar la pieza, esta se encapsula y se pule para finalmente atacarla con un ataque químico y visualizar su superficie en el microscopio. Por último, se estudiarán las imágenes de las microestructuras obtenidas para ver los resultados obtenidos con los parámetros seleccionados.

En cada uno de los ensayos, se seleccionan varios cortes por pieza con intención de evitar singularidades y obtener datos más fiables para reforzar los resultados y obtener conclusiones.

Para terminar con el proyecto, se realiza una pieza demostradora con un termopar totalmente integrado con los parámetros obtenidos de los ensayos previos, dando validez al estudio.

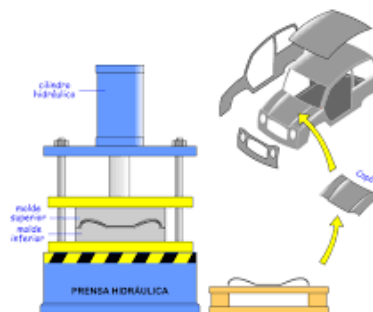
## 5. Descripción de requerimientos y análisis del estado del arte

### 5.1 Estampación en caliente

Los procesos de estampación son procesos de fabricación ampliamente extendidos en diversos sectores para fabricación de piezas muy diferentes entre sí. Estos procesos de estampación se basan en la fabricación de piezas a partir de chapa metálica, pudiendo lograr largas tiradas en serie de piezas en un tiempo relativamente corto, aumentando así la producción. Por este motivo entre otros, es el sector de la automoción uno de los que más reclama esta tecnología en sus procesos de producción.

En los procesos de estampación, las chapas metálicas se someten a grandes cargas de compresión llevadas a cabo por troqueles que funcionan como molde para dar forma a la pieza final. Sobre los troqueles, se aplican cargas de forma progresiva o mediante percusión continua. Uno de los troqueles se deslizará por una guía y el otro se mantendrá estático. En la actualidad, existen dos tipos de procesos de estampación distintos, la estampación en frío y la estampación en caliente.

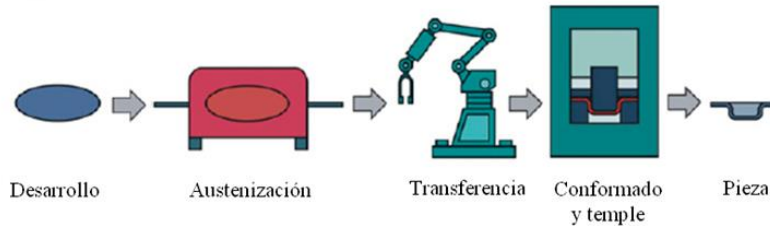
En los procesos de estampación en frío, los elementos metálicos a manipular se encuentran a baja temperatura y las chapas empleadas son de un espesor menor que en la estampación en caliente. Los aceros utilizados en este caso suelen ser aceros de baja aleación, aleaciones de aluminio o materiales maleables o dúctiles. Las claves a considerar de este tipo de estampación son la capacidad de embutición, la anisotropía que logra, el endurecimiento por deformación y la capacidad de recuperación o “Springback” de la chapa estampada por los troqueles.



*Ilustración 1. Obtención de piezas de automoción mediante estampación en frío.*

Por otro lado, los procesos de estampación en caliente son métodos más complejos en los que se requiere calentar previamente el material a temperaturas superiores a la de austenización para una reestructuración interna del material. Esto aumenta también su maleabilidad y así se puede conseguir la geometría deseada con mayor facilidad. Las operaciones a realizar son el calentamiento, la estampación y el templado de la pieza, que precisan de mayor control a lo largo del proceso.

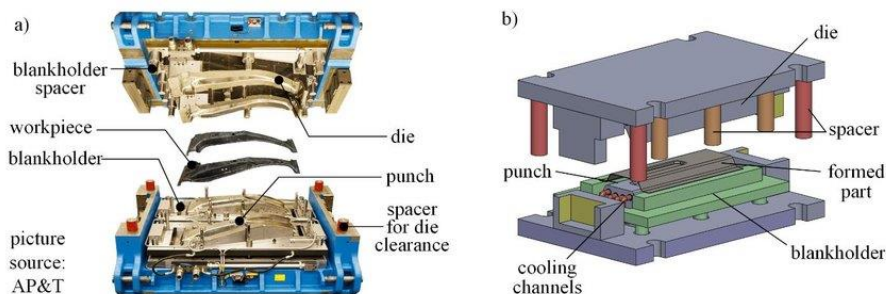




*Ilustración 2. Etapas de la estampación en caliente.*

Dentro de los procesos de estampación en caliente existen dos métodos de fabricación diferentes, el método directo y el indirecto. El método directo, comienza con el calentamiento del metal hasta su temperatura de austenización en un horno y después es transportado al troquel donde será deformado antes de bajar de temperatura. En el método indirecto, se le da una preforma a la chapa mediante estampación en frío antes de introducirla en el horno para calentarla y seguir el mismo proceso que en el método directo. Este paso inicial produce un aumento de la capacidad de deformación en las zonas previamente deformadas y posibilita lograr piezas más complejas.

Aunque sean procesos diferentes los de estampación en frío y en caliente, ambos buscan mejoras de eficiencia en sus procesos y herramientas para incrementar la productividad y reducir los costes. Es por eso que en los procesos de estampación en caliente que requieren un mayor control de parámetros como temperatura y presión, se quieren obtener una mayor cantidad de datos de los mismos y con una buena precisión para mantener el proceso bajo control en todo momento.



*Ilustración 3. Troqueles de estampación.*

Como se ha mencionado anteriormente, los troqueles deforman el material haciendo de molde para la chapa introducida, soportando grandes temperaturas y presiones, lo que provoca un gran desgaste en ellos. Estas herramientas, son piezas de muy alto valor añadido ya que se fabrican exclusivamente para dar forma a una pieza con la geometría exacta que esto requiere y son fabricadas para dar servicio durante mucho tiempo sin ser sustituidos. Por lo tanto, el control del proceso adquiere una mayor importancia ya que puede hacer que el utillaje se vea sometido a cargas más controladas evitando fallos catastróficos que produzcan un deterioro prematuro de los mismos.

Aun así, al ser los troqueles el propio molde de la pieza, deben tener una geometría estanca donde el material estampado no puede escaparse por ninguna rendija, y es ahí donde deben

ir los dispositivos de medición, siendo capaces de funcionar para proporcionar la información deseada, pero sin perjudicar el proceso de estampación.

## 5.2 Sensores de temperatura

El uso de dispositivos de medición de datos está cada vez más extendido hoy en día. Se pueden encontrar este tipo de piezas prácticamente en todos los sitios, desde teléfonos móviles hasta electrodomésticos y relojes. Los sensores son herramientas capaces de medir una característica y que mediante una señal eléctrica lo trasladan a un monitor donde se muestra el valor numérico de ese parámetro.

Con los objetivos de optimización y control de los procesos de fabricación, los sensores son utilizados en las máquinas de producción para visualizar los datos en tiempo real del proceso que se está llevando a cabo dentro de la máquina. Estos datos son mostrados en una pantalla o son enviados a ordenadores conectados a la máquina para tener un archivo completo del proceso y poder analizarlo exhaustivamente. El manejo constante de todos estos datos, hacen posible una optimización del proceso de producción mediante cambios o modificaciones en los mismos, y también pueden servir para adelantarse a posibles fallos que produzcan daños a la máquina o a los operarios que la manejan.



*Ilustración 4. Conectividad inalámbrica de la máquina.*

Dentro del mundo de los sensores, hay varios tipos de ellos. Pueden medir temperaturas, fuerzas, velocidades, intensidad... En los procesos de fabricación como en la estampación en caliente, adquieren una mayor importancia los sensores que miden los parámetros clave del proceso como pueden ser la presión y la temperatura. Los sensores de presión consisten en la medición de la deformación que sufre una membrana en su interior. Esta capacidad de deformación se puede medir eléctricamente y correlacionarse con la presión aplicada. Dentro de los sensores de temperatura, están los que tienen un contacto directo con la pieza a medir, como son los termopares y termistores, y los que no, que funcionan midiendo la radiación térmica. Estos sensores permiten medir la temperatura mediante una señal eléctrica determinada. Dicha señal puede enviarse directamente o mediante el cambio de la resistencia [12].



Ilustración 5. Sensores de presión y sensores de temperatura.

En el presente estudio, se prestará especial atención a los sensores de temperatura del tipo termopar, que serán los utilizados posteriormente en los ensayos del proyecto. El termopar es un par de empalmes o uniones que se forman a partir de dos metales distintos. Un empalme representa una temperatura de referencia y el otro representa la temperatura a medir. Los mismos funcionan cuando una diferencia de temperatura provoca un voltaje, “Efecto Seebeck”, que depende de la temperatura, y que el voltaje es convertido, a su vez, en una lectura de la temperatura. Los termopares se usan porque son económicos, resistentes y fiables; no requieren una batería y pueden ser utilizados en un amplio rango de temperaturas. Estos presentan un buen rendimiento hasta los  $2.750^{\circ}\text{C}$ , por lo que son adecuados para utilizarlos en el proceso láser del presente estudio [13].

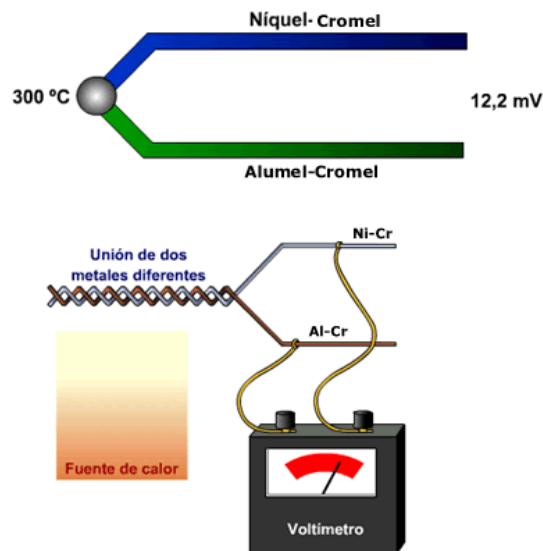


Ilustración 6. Funcionamiento de un termopar.

### 5.3 Tecnologías láser

El láser, cuyas siglas en inglés significan *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es un dispositivo generador de luz, el cual está basado en el fenómeno de emisión

estimulada proporcionada por los espejos (el resonador), un efecto que se dedujo con el equilibrio termodinámico y la retroalimentación óptica [1].

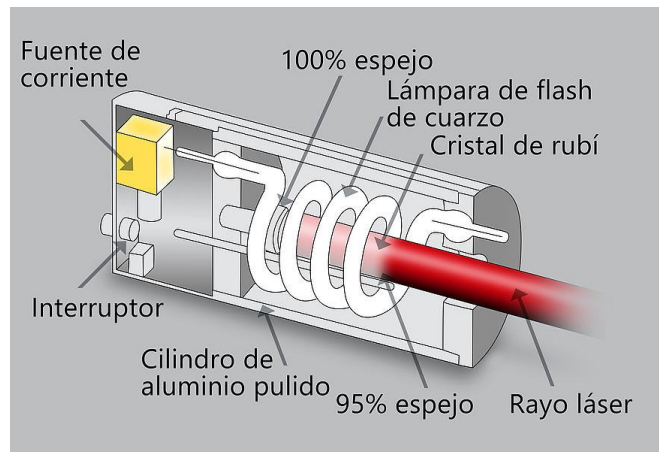


Ilustración 7. Generación del láser.

A pesar del retraso en la implantación de estas tecnologías en la industria, hoy en día estos sistemas están implantados en infinidad de sectores. Son tecnologías estudiadas y fiables utilizadas en entornos tanto electrónicos como industriales, los cuales aportan grandes beneficios a los procesos a realizar.

### 5.3.1 Características del láser

Las características fundamentales de la radiación láser son las siguientes:

- **Monocromaticidad:** El haz láser emite una radiación de onda de una sola longitud de onda, en oposición a las fuentes convencionales como las lámparas incandescentes que emiten en un rango más amplio, entre el visible y el infrarrojo, de ahí que desprendan calor. Esto es lo que permite enfocar el haz en un punto muy pequeño, al contrario de la luz blanca que contiene varias longitudes de onda.

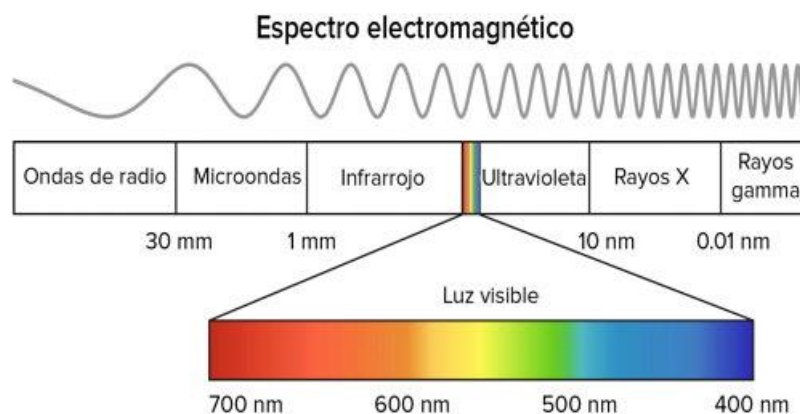


Ilustración 8. Espectro electromagnético.

- **Direccionalidad:** La radiación láser tiene una divergencia muy pequeña, es decir, puede ser proyectado a largas distancias sin que el haz se abra o disemine la misma cantidad de energía en un área mayor como sucede en el caso de una bombilla incandescente. De esta forma, se logra concentrar una gran cantidad de energía donde se enfoca el haz sin afectar a las zonas próximas.

- **Coherencia:** La luz láser se transmite de modo paralelo en una única dirección debido a su naturaleza de radiación estimulada, al estar constituido el haz láser con rayos de la misma fase, frecuencia y amplitud.

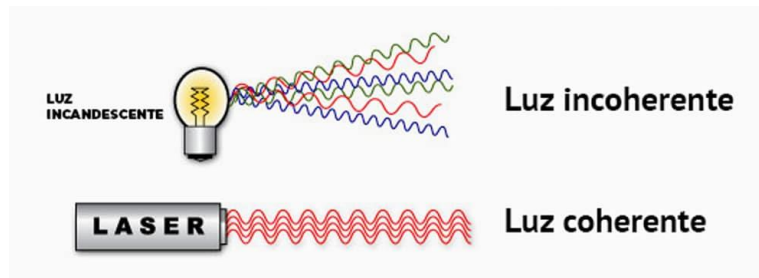


Ilustración 9. Coherencia del láser.

### 5.3.2 Funcionamiento del láser

Para lograr la generación de un haz láser, se debe tener una cavidad óptica diseñada para que la luz sea capaz de circular, que consta de dos espejos con distinta reflectancia, uno que lo refleja en su totalidad y el otro que lo refleja parcialmente. A este conjunto se le llama resonador y permite que las ondas reboten internamente y que la radiación láser salga por una cavidad. En esa cavidad hay un medio activo que puede ser sólido, líquido o gas, y dependiendo del medio se excita de una forma diferente. Para lograr la amplificación es indispensable una inyección de energía y esta se consigue a partir del bombeo [9].

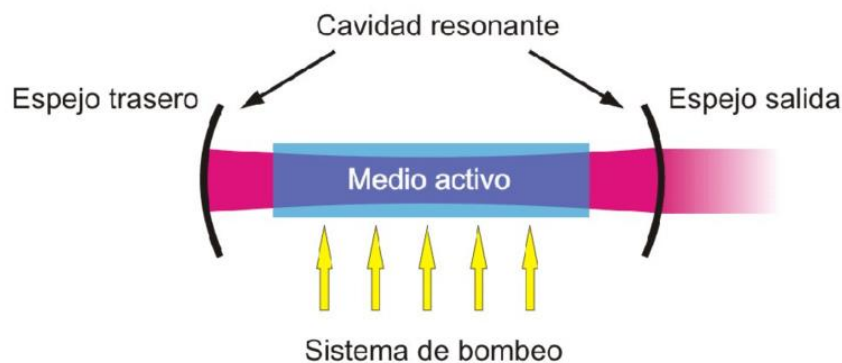


Ilustración 10. Generación del haz láser.

- **Bombeo:** Tiene como función principal la excitación del haz en el medio activo, con el fin de producir una amplificación de radiación. El bombeo puede ser óptico o eléctrico. El primero de ellos es aplicado en sistemas láser con medios activos en estado sólido mientras que el segundo se utiliza en sistemas láser con medios activos semiconductores y de gas.
- **Cavidad óptica:** Este sistema posee dos espejos dieléctricos, con alta reflectividad, responsables de que la luz rebote. Uno de los espejos es totalmente reflectante mientras que el otro tiene una reflectancia menor. Una pequeña porción de la potencia interna de la cavidad óptica saldrá a través de este segundo espejo en forma de un

haz de luz con las propiedades anteriormente mencionadas.

- **Medio activo:** Es el lugar que se encuentra entre los dos espejos y en él se produce la excitación y por tanto la amplificación de la luz. Dependiendo del tipo de material que componga el medio, se emitirá una longitud de onda diferente.

### 5.3.3 Aplicaciones de la tecnología láser en el sector industrial

Como se ha mencionado anteriormente, la tecnología láser ha llegado con cierto retraso al ámbito de la fabricación industrial pero el crecimiento de esta tecnología en diferentes procesos y sus aplicaciones ha hecho posible la gran aceptación que tiene en la actualidad. Aun así, el gran problema que suponen es el coste inicial de la inversión a realizar para poder implementar maquinaria con esta tecnología para sustituir sus instalaciones actuales. Gracias a que las ventajas del uso de esta tecnología llaman la atención, se sigue investigando en cómo mejorar y optimizar estos procesos y poco a poco se consigue que sean económicamente más competitivos. En la industria los más económicos y eficientes son los láseres de fibra.

A continuación, se mencionarán varios procesos de fabricación en los que se utiliza la tecnología láser, diferentes a la fabricación aditiva que se desarrollará con mayor profundidad en el próximo apartado, con una breve explicación de cada una acompañada con una ilustración para visualizar el proceso.

- **Soldadura láser:** La soldadura por haz laser o LBW (*Laser-Beam Welding*) es un proceso de soldadura por fusión que utiliza la energía aportada por el haz láser para fundir y recristalizar el material o los materiales a unir, obteniendo la unión entre ambos. Esto se consigue por el calentamiento de la zona a soldar y la posterior aplicación de presión entre estos puntos. Normalmente la soldadura láser se efectúa bajo la acción de un gas protector que suele ser helio o argón.

La mayor ventaja de este método es su capacidad de concentrar el calor para la fusión en una zona muy reducida por lo que la zona térmicamente afectada es muy pequeña. Por eso se utiliza, entre otras cosas, para la reparación de utillaje industrial y la fusión por soldadura de elementos de diversos materiales.

La soldadura por láser es una de las tecnologías láser más extendidas en la industria dado que es una tecnología muy desarrollada y a que es un proceso muy versátil. Este tipo de soldadura se ha implementado en numerosos sectores, como pueden ser el de la automoción, el aeronáutico o en el de energías renovables.

Las mayores desventajas de esta tecnología son su alto coste inicial y el coste del proceso que suponen una gran inversión para las empresas a la hora de implantarlo [3].





Ilustración 11. Soldadura por láser.

- **Corte por láser:** El corte por haz láser o LBC (*Laser-Beam Cutting*), es una tecnología comúnmente utilizada para corte por chapa, aunque sirve para realizar cortes sobre otros materiales también. Esta chapa se divide en varios elementos mediante la energía aportada por el láser sobre la superficie de la chapa, fundiendo el material. Existen varios métodos de corte por láser, pero el más utilizado en la industria es el corte por fusión del material. Como se ve en la próxima ilustración, los cortes evacúan el material cortado por el surco realizado en el material fundido. La evacuación del material es forzada por un gas a presión llamado gas de asistencia.

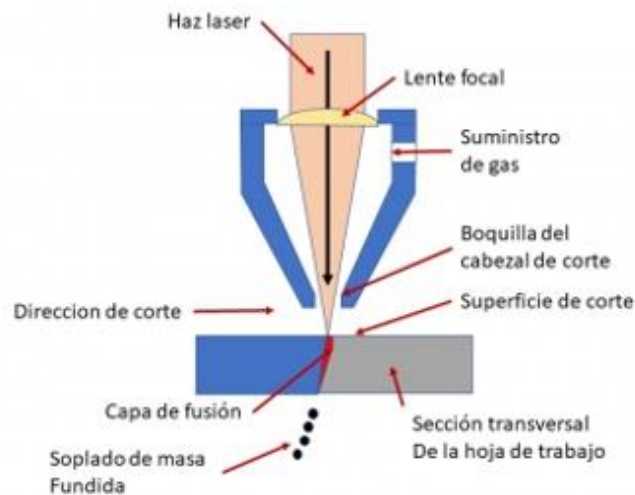
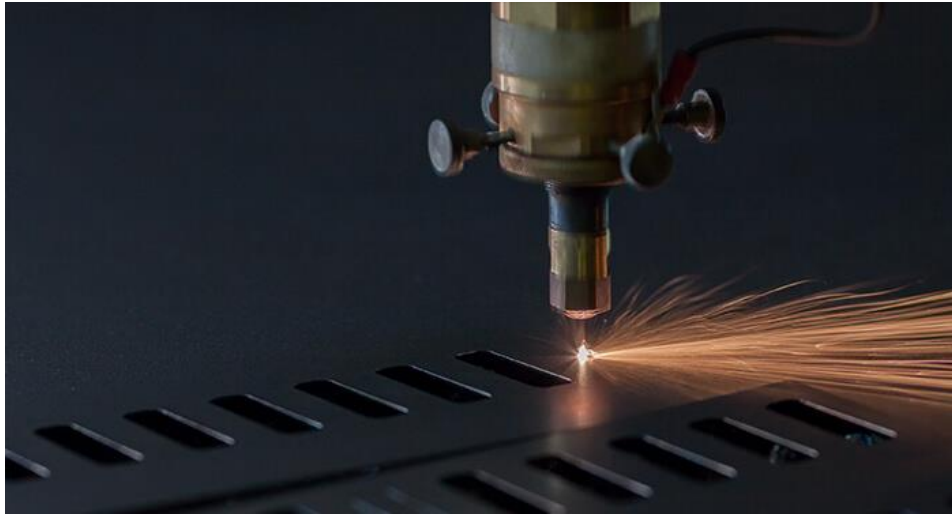


Ilustración 12. Esquema de corte por láser.

La ventaja de los procesos de corte por láser es que son programables y esto permite alcanzar una alta productividad a la hora de la fabricación de piezas. Pero, para conseguir una alta eficiencia en el corte, los procesos de corte deben programarse correctamente, siendo esta una tarea importante. Para ello, hay que tener en cuenta la densidad de potencia del láser, el diámetro del "spot" del láser, la velocidad de avance y la presión del gas de asistencia [2].

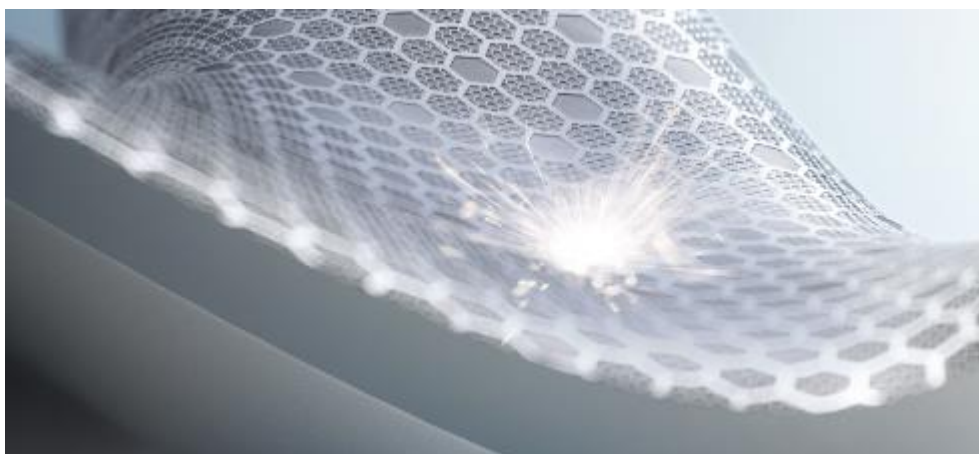
El corte por láser, a diferencia de la soldadura, aumenta mucho la temperatura en la zona circundante al área cortada, y esta es alterada térmicamente. Esto supone un problema, ya que la estructura puede verse afectada y producir estrías en las paredes laterales.



*Ilustración 13. Corte por láser.*

- **Texturizado y marcado:** El texturizado láser o *engraving*, es una tecnología que mediante energía láser es capaz de realizar una amplia variedad de acabados superficiales sobre diferentes materiales, con el objetivo de mejorar las propiedades de la pieza [7].

En estos procesos, se utiliza un láser pulsado, para conseguir una anchura y profundidad adecuada de las ranuras, como se puede ver en la imagen mostrada a continuación.



*Ilustración 14. Superficie texturizada por láser.*

Por otro lado, otra utilidad que se le da a la tecnología láser parecida al texturizado, es el marcado. Este proceso realiza una modificación puramente estética en la pieza, con el objetivo de marcarla. Es muy común el uso del marcado o grabado láser para realizar, por

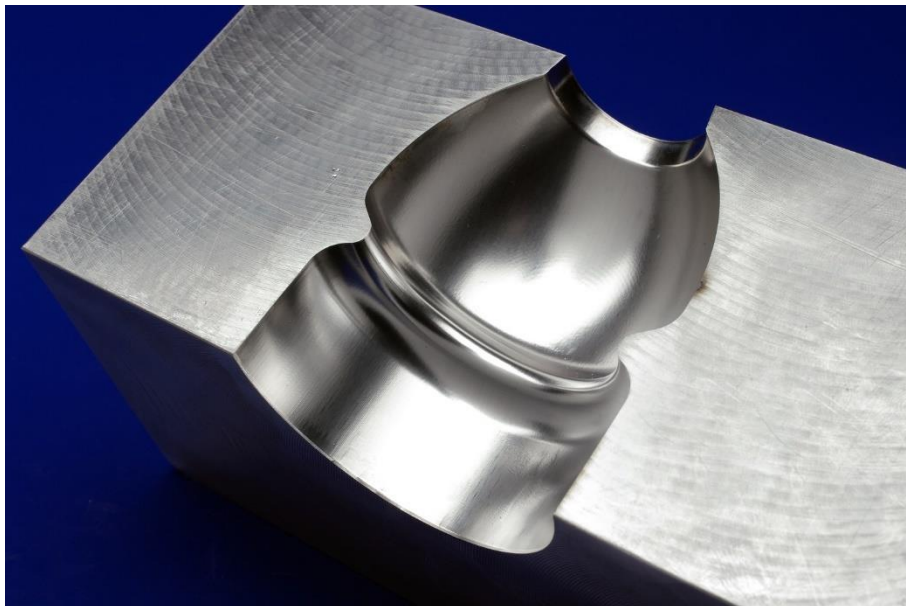


ejemplo, anotaciones de números de serie de piezas que no se borren en mundo de la industria, aunque también se puede utilizar de forma decorativa. La superficie se marca mediante un haz láser sin llegar a perjudicar la pieza, marcándola generalmente en zonas donde la superficie no esté en contacto con otras piezas y sea visible.



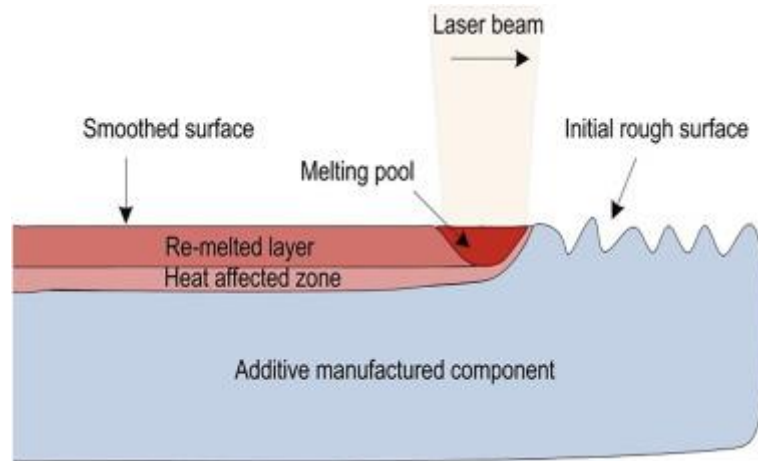
*Ilustración 15. Marcado láser.*

- **Pulido láser:** El Pulido láser permite realizar mejoras sobre la superficie de una pieza mediante láser, aunque, a diferencia del texturizado, el objetivo del pulido es lograr una rugosidad superficial menor y un mejor acabado de la pieza. Debido a la reducción de tiempo para lograr este pulido respecto al proceso manual, el pulido láser está consiguiendo implantarse en la industria.



*Ilustración 16. Superficie pulida por láser.*

Para lograr una superficie pulida, se funden los picos de la rugosidad del propio material con el haz láser. El haz pasa por encima de los picos, fundiéndolos y haciendo que el material fundido rellene los valles de la superficie, nivelándola. La zona más cercana a la superficie pulida se ve afectada térmicamente debido al calor aportado por el láser incidente, sufriendo cambios en su estructura metalúrgica, pudiendo modificar la dureza y las tensiones residuales en el material [8].



*Ilustración 17. Esquema de pulido láser.*

#### **5.4 Laser Metal Deposition o LMD**

Las tecnologías de fabricación aditiva, son capaces de fabricar piezas añadiendo material sobre un sustrato base, al contrario que los métodos de mecanizado tradicionales que se basan en arrancar material a una pieza de material bruto inicial para lograr la pieza deseada. El uso de la fabricación aditiva es cada vez más extendido hoy en día ya que sus capacidades no se limitan a la generación de geometrías complejas, sino que también puede ser utilizada en reparaciones de piezas de alto valor añadido creadas por distintos métodos de fabricación. Además, hay una amplia gama de materiales con los que el LMD puede trabajar, incluyendo materiales difíciles de mecanizar mediante métodos tradicionales y añadiendo la posibilidad de trabajar con más de un material a la vez, creando una mezcla entre ellos. Aun así, los acabados superficiales logrados mediante este proceso de fabricación requieren, en la mayoría de los casos, un posterior mecanizado ya que el resultado obtenido no es el mismo.

En este proyecto, se utilizará la tecnología LMD de entre las tecnologías de fabricación aditiva disponibles ya que es idónea para la reparación de piezas con geometrías complejas y de alto valor añadido, además de que es perfectamente compatible con los materiales con los que se va a trabajar.



Ilustración 18. Laser Metal Deposition.

Dentro de las tecnologías láser, hay varios tipos de procesos empleados. Los procesos LMD son en gran medida a los procesos de soldadura láser. La diferencia entre ambos es que en los procesos de soldadura no se usa material de aporte para realizar la unión, sino que el propio metal base es el que se funde para generar la soldadura gracias a la energía aplicada por el láser. Por lo demás, ambas son tecnologías que son capaces de aportar energía en superficies de fino espesor, con una mínima afectación térmica sobre el sustrato.

En la fabricación aditiva existen dos grandes ramas, en lo que a procesos de fabricación se refiere. Una de ellas es el SLM (*Selective Laser Melting*) el cual contiene dos etapas en su proceso, deposición y fusión. La otra es el aporte por láser o LMD, y esta consta de una única etapa, realizando las dos etapas del SLM a la misma vez para la fabricación de la pieza [4].

El SLM o fusión selectiva con láser es una tecnología de fabricación aditiva, en la que primero se deposita el material a fundir en una superficie horizontal constituida por una fina capa de polvo y después se funden con el láser las superficies que se quieran aportar. Esta etapa es iterativa ya que, una vez aportada la primera capa, la superficie horizontal desciende para que se aporte una segunda capa de material en polvo sobre la primera, repitiendo el proceso hasta realizar la pieza completa.

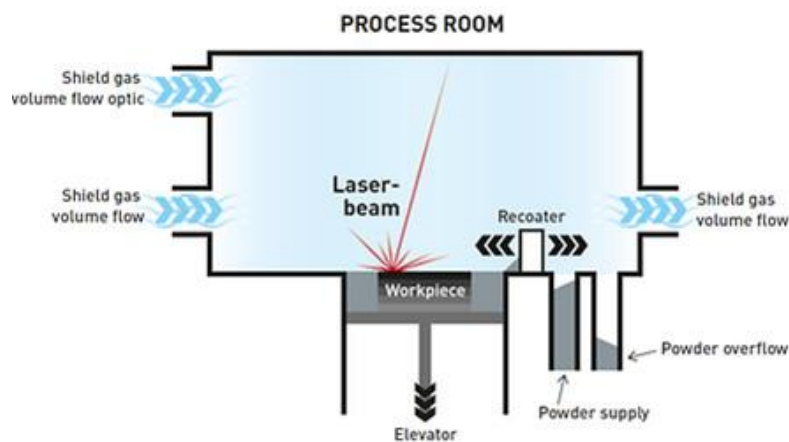


Ilustración 19. Selective Laser Melting.

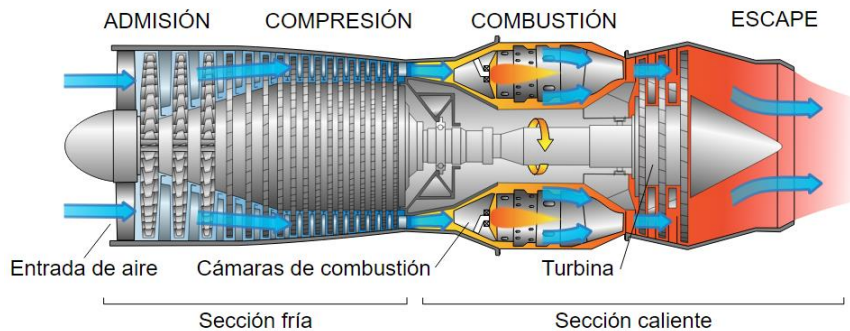
El SLM tiene como inconveniente la obligación de realizar los aportes en dos pasos, que ralentiza los procesos de fabricación. Además, hay que tener en cuenta que tampoco se pueden realizar procesos en superficies no horizontales limitando su capacidad de generación de geometrías complejas.

Los procesos de aporte por láser o *Laser Metal Deposition* en cambio son procesos que superan esas limitaciones del SLM. En estos procesos se añade material en polvo o mediante hilo y se fusiona con el sustrato gracias al alto aporte energético del haz láser. Al igual que en el proceso anterior, el proceso se realiza capa por capa, aumentando las dimensiones de la pieza hasta que alcance la geometría final. En este caso solo se añade el material en polvo donde se quiere fundir. Una de las mayores ventajas del LMD es su posibilidad de fabricación con una amplia gama de materiales y la manera de alimentar estos materiales ya sea por hilo (*Wire Feeding*) como por polvo (*Laser Cladding by powder injection*). Este último es el que se utilizará a lo largo de los ensayos realizados en este proyecto.

Para los procesos de LMD se utilizan dos flujos de gas, cada uno con una función específica. Uno de ellos es el gas de arrastre y su función es alimentar la zona de aporte con el polvo necesario transportándolo desde las tolvas del alimentador de polvo hasta la boquilla del láser. Esta corriente de gas empuja el polvo hasta cubrir la superficie del sustrato donde el “spot” del láser funde ambas superficies. El segundo de los gases es el gas de protección y el objetivo de este es crear una campana protectora alrededor del sustrato y la zona aportada, evitando así que ningún elemento contamine el aporte o reaccione con él, evitando defectos en la estructura del material. Además, el gas de protección también es el encargado de proteger las lentes del láser, evitando que cualquier partícula obstruya el haz láser. Estos gases suelen ser gases inertes, como nitrógeno, argón o helio, para evitar cualquier reacción u oxidación de las piezas y materiales aportados [5].

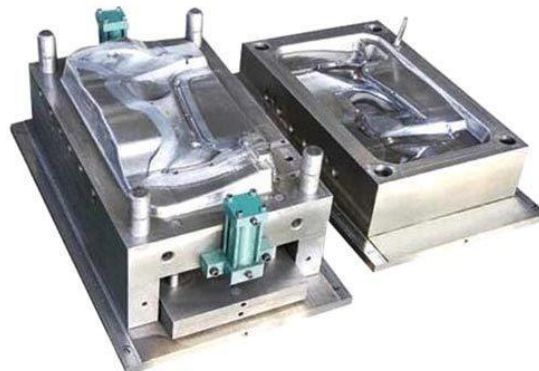
La capacidad de trabajar con una gran variedad de aleaciones metálicas en polvo no sólo da una gran variedad de materiales o combinaciones que utilizar, sino también la posibilidad de trabajar con materiales difíciles de mecanizar con métodos tradicionales. La capacidad de mezclar materiales en la proporción que se desee configurando los alimentadores de polvo, permite generar capas de materiales diferentes aportando características específicas a la pieza. Se puede realizar, por ejemplo, un cambio de composición gradual de los materiales aportados para otorgar a la pieza de una mayor dureza en la superficie. A su vez, el LMD presenta una gran oportunidad para la realización de piezas imposibles de fabricar por métodos de mecanizado, ya sea por el coste que supondría mecanizar un material de partida hasta obtener la pieza final, como por la dificultad de conseguir la geometría final.

Las tecnologías *Laser Metal Deposition* se utilizan cada vez más en la industria, en sectores como la máquina herramienta, energías renovables, automoción e industria aeroespacial. Por ejemplo, en la industria aeronáutica existen piezas como las turbinas de los aviones, con excepcionales requerimientos. En estos casos, se utiliza titanio en la zona del compresor, debido a su ligereza y a su vez sus características mecánicas y tras la cámara de combustión, aleaciones con base níquel como el Inconel 718 que presenta una gran capacidad de conservar las propiedades mecánicas en altas temperaturas además de no expandirse. Estos materiales son realmente difíciles de manipular mediante métodos de mecanizado, además de la posibilidad de reparación que ofrece el LMD que, en estas piezas de muy alto valor añadido, otorga ventajas económicas importantes.



*Ilustración 20. Etapas de un turborreactor*

En este estudio el material donde se pretende analizar la posibilidad de realizar un aporte es el troquel de un proceso de estampación en caliente. En similitud con los álabes de los turborreactores puestos como ejemplo, estas herramientas sufren altísimos desgastes a temperaturas elevadas, teniendo que tener una gran resistencia a elevadas temperaturas y al desgaste, sin producirse deformaciones. También presentan geometrías complejas a menudo, ya que son los moldes los que dan forma a la pieza final y por eso deben tener esas superficies. Por tanto, los materiales con los que están fabricados son por ejemplo el acero de herramientas AISI H11, que no presenta tantas dificultades de mecanizado como el titanio o el Inconel 718 pero el LMD facilita la manipulación de este material respecto a otros métodos de mecanizado.



*Ilustración 21. Troqueles de estampación en caliente.*

Una de las mayores desventajas que presenta el uso de tecnologías LMD es referente al aspecto económico no del proceso, sino de los materiales que hay que emplear como pueden ser los gases, cuyo coste es muy elevado. Estos gases son necesarios en el proceso de aporte y como se requieren gases que normalmente son gases nobles, suelen tener un valor muy elevado debido a su escasez [6].

Otra limitación que presenta el LMD es su incapacidad de lograr acabados excepcionales, por lo que son necesarios en la mayoría de los casos, procesos de mecanizado posteriores para lograr la superficie de acabado que requiere la pieza.

### **5.5 Descripción de equipos y materias primas necesarias**

Los ensayos se realizan con los equipos disponibles en el Taller del Departamento de Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao fundamentalmente, aunque también se utiliza el equipo láser del Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA) para la segunda etapa de los ensayos. Para la ejecución del proceso de aporte láser será necesario utilizar un conjunto de equipos que forman el centro de aporte por láser o LMD. Además, una vez realizados los ensayos se utilizan las herramientas que permiten obtener y preparar las probetas a partir de los sustratos aportados, para posteriormente analizar su microestructura en el microscopio. Todos estos conjuntos de máquinas y herramientas son los que se describen a continuación.

#### **Generador Láser**

En la industria de hoy en día se pueden identificar varios tipos de generadores láser que pueden ser clasificados por sus parámetros o aplicaciones. Atendiendo al tipo de medio en el que se propaga el láser, estos pueden ser:

- Láseres de estado sólido: tienen material láser distribuido en una matriz sólida, por ejemplo, los de rubí o neodimio-YAG.
- Láseres de gas: tienen una salida primaria de una luz roja visible. Los gases más comunes utilizados son el CO<sub>2</sub>, helio y helio-neón.
- Láseres de excímeros: utilizan gases reactivos como el cloro y el flúor mezclado con gases inertes como el argón o el xenón. Cuando se estimula eléctricamente se produce un dímero y aplicado al láser, produce luz en el rango ultravioleta.
- Láseres de colorante: estos utilizan tintes orgánicos complejos como medio láser. Por ejemplo, la rodamina 6G en solución líquida.
- Láseres de semiconductores o de diodo: estos dispositivos son generalmente muy pequeños y usan poca energía. Pueden estar integrados en matrices más grandes.

Por otro lado, atendiendo al tiempo de duración de la emisión láser estos pueden ser clasificados en:

- Láseres de onda continua: este láser se bombea continuamente y emite luz de forma continua, proporcionando una potencia de haz media estable.
- Láseres pulsados: lo opuesto a los de onda continua. Emiten luz en forma de pulsos ópticos de cierta duración, presentando patrones de repetición.

Para este proyecto, se utiliza un láser de estado sólido, concretamente, un láser de fibra. En él, el medio amplificador del haz de luz es una fibra óptica dopada con neodimio, erbio, iterbio, diprosio, holmio, praseodimio y tulio. Para el bombeo se utilizan uno o varios diodos láser. El generador de láser del que se dispone en el taller es un Yb:YAG Rofin-Sinar FL010.



*Ilustración 22. Generador láser Rofin FL010.*

Los parámetros más importantes de un generador láser son el tipo de onda, la potencia capaz de suministrar, la distancia focal y el diámetro del spot. El tipo de onda puede variar el resto de parámetros del láser. La potencia permite alcanzar un rango de temperaturas para poder fundir el polvo inyectado en el sustrato. El diámetro del spot hace referencia al área en el que incide el láser sobre el sustrato. La variación de estos dos últimos hace que aumente el rango de posibilidades de aplicación del láser.

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



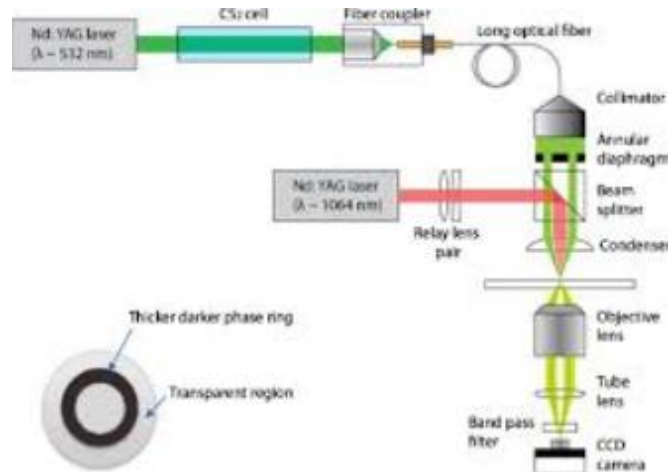


Ilustración 23. Recorrido del láser.

La potencia máxima de este generador láser de fibra es de 1000 W y su longitud de onda es  $\lambda=1080\pm 10\text{nm}$ . Como se ha mencionado anteriormente, la modificación de este último parámetro produce cambios en los demás parámetros, por tanto, hay que tenerlo muy en cuenta. Además de los parámetros, la absorción del material también depende de la longitud de onda [10].

Por otro lado, el generador del que se dispone en el CFAA es un TruDisk 3001.



Ilustración 24. Generador láser TruDisk 3001.

Este generador tiene como característica principal la disposición de dos cables de fibra óptica coaxiales de 100  $\mu\text{m}$  y 400  $\mu\text{m}$ . Mediante control numérico, se puede cambiar automáticamente de fibra. Además, el diámetro del spot es programable y de mayor rango gracias a la doble fibra.

- De 100  $\mu\text{m}$  a 2 mm para la fibra de 100  $\mu\text{m}$ .
- De 400  $\mu\text{m}$  a 4 mm para la fibra de 400  $\mu\text{m}$ .

La potencia máxima de este generador es de 3000 W y su longitud de onda es máxima de este generador láser de fibra es de 3000 W y su longitud de onda es  $\lambda=1030\text{ nm}$ .



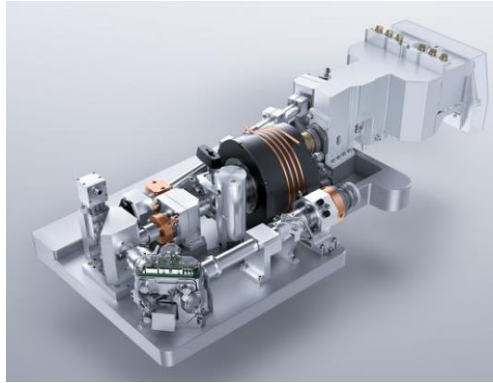


Ilustración 25. Disposición de fibra óptica variable.

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

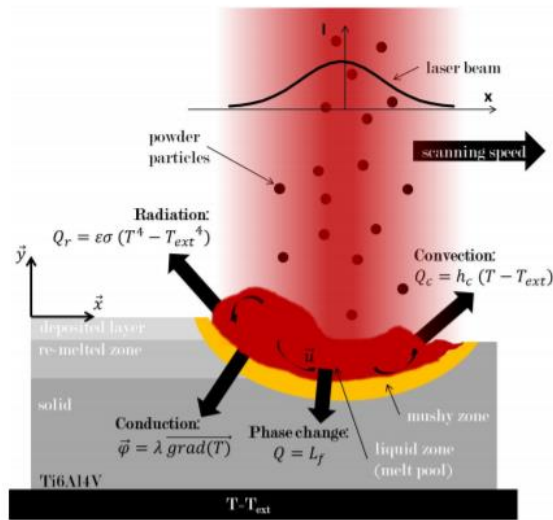


Ilustración 26. Proceso de fusión por láser.

## Sistema de refrigeración

Este elemento es necesario para el correcto funcionamiento del generador láser, ya que el generador alcanza altas temperaturas y estas deben ser compensadas con el sistema de refrigeración para que funcione durante un periodo de tiempo. Por seguridad, si el sistema de refrigeración no se conecta, el láser no se enciende para evitar sobrecalentamientos y posibles averías. El equipo refrigerador disponible en el Taller del Departamento de Mecánica es un KKT Kraus OLB-5.



*Ilustración 27. Equipo de refrigeración.*

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

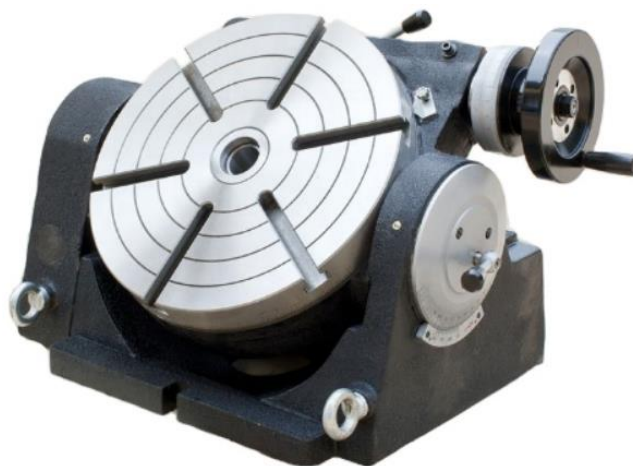
## Centro de procesamiento láser

Para los primeros ensayos se utiliza el centro de procesamiento láser disponible en el Taller del Departamento de Mecánica. Esta máquina es un antiguo centro de fresado Kondia Aktinos, adaptada para trabajar con láser.



*Ilustración 28. Centro de procesamiento láser.*

Este conjunto abarca varios sistemas como la boquilla del láser, y también la “cuna” rotacional y de cabeceo que proporciona el movimiento de los ejes A y C. Este accesorio se adapta para procesos que requieren de un movimiento de 5 ejes como es el caso.



*Ilustración 29. Mesa de posicionamiento con inclinación.*

Esta mesa se mueve en los ejes X-Y por las guías situadas en el centro de procesamiento láser, mientras que el movimiento en el eje Z lo aporta la propia boquilla del láser. En este conjunto los movimientos de cabeceo y rotacional están acoplados en un mismo elemento. Para operaciones más sencillas en las que no se requiera el uso de los 5 ejes, esta mesa es sustituida por una de posicionamiento X-Y que aporta movimiento únicamente en esos dos ejes.

El centro de procesamiento, por seguridad, no puede trabajar con el láser si la puerta no está cerrada ya que puede causar lesiones oculares graves en caso de haber contacto visual. Para poder visualizar las operaciones llevadas a cabo dentro, se dispone de un monitor Samsung en el lateral de la máquina, que reproduce las imágenes obtenidas dentro durante el proceso de aporte con una cámara digital. Para poder procesar toda la información de los programas y manejar las operaciones llevadas a cabo, se hace uso del centro de control numérico de la Kondia.

En el Centro de Fabricación Aeronáutica Avanzada, el centro de procesamiento láser es un TruLaser Cell 3000 de la marca alemana Trumpf. Esta máquina es capaz de llevar a cabo operaciones en 5 ejes.



*Ilustración 30. Centro de procesamiento TruLaser Cell 3000.*

Esta máquina específicamente creada para trabajar con láser, cuenta con funciones más avanzadas que la máquina previamente descrita. Cuenta con una cámara coaxial cuyo mando está situado debajo del display principal, donde mediante control numérico se llevan a cabo todas las operaciones dentro del centro de procesamiento láser. La máquina cuenta con un software CAM dedicado: TruTops Cell. Para mayor accesibilidad a la hora de trabajar con piezas de diferente tamaño y también para un mayor control del proceso llevado a cabo dentro, tiene tres puertas de acceso, una en frente y otra a cada lado.

Por otra parte, los movimientos de rotación y cabeceo a la hora de realizar el aporte están desacoplados ya que, en vez de utilizar una mesa rotatoria con posibilidad de cabeceo, se utiliza una mesa capaz de moverse en los ejes X-Y que además habilita los ejes A y C dependiendo de la configuración, mientras que la propia boquilla puede rotar además de variar de altura en Z proporcionando un eje B a diferencia de la máquina del taller.

En el caso de este láser, se utiliza una boquilla diferente para cada aplicación, debido a la posibilidad de realizar más tipos de operaciones como soldadura o corte por láser. El cambio de boquilla no es automático, pero se puede realizar en un tiempo menor de 15 minutos.

## Boquilla

La boquilla instalada en la máquina del Taller de Mecánica, es una boquilla diseñada en el mismo taller para los procesos de aporte por láser. Esta boquilla tiene como objetivo dirigir el conjunto de polvo y gas de arrastre hacia el punto en el que incide el haz de luz sobre el sustrato. Además del gas de arrastre, consta de otro circuito mediante el cual se proporciona un caudal de gas de protección sobre la zona de aporte con el objetivo de crear una zona inerte y evitar en la medida de lo posible que se produzcan reacciones no deseadas en el material. Por otro lado, este gas también protege el orificio central de partículas o impurezas que pueden dañar lente que hace enfocar al láser.

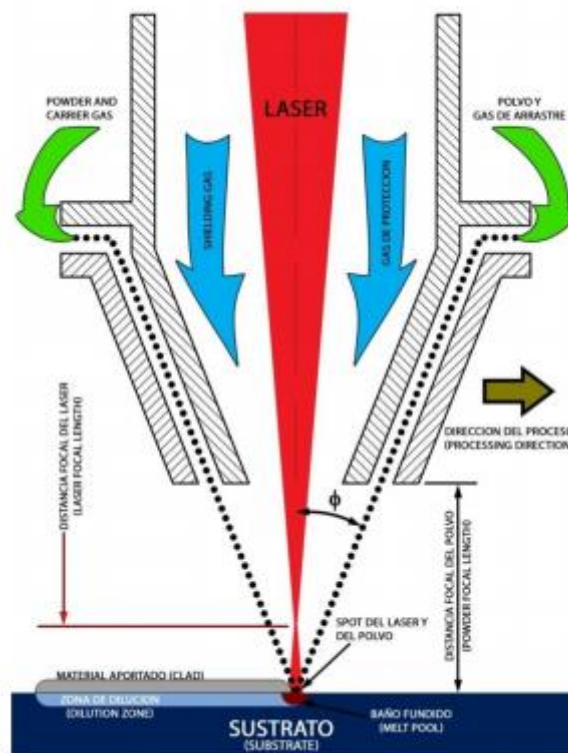


Ilustración 31. Boquilla coaxial.

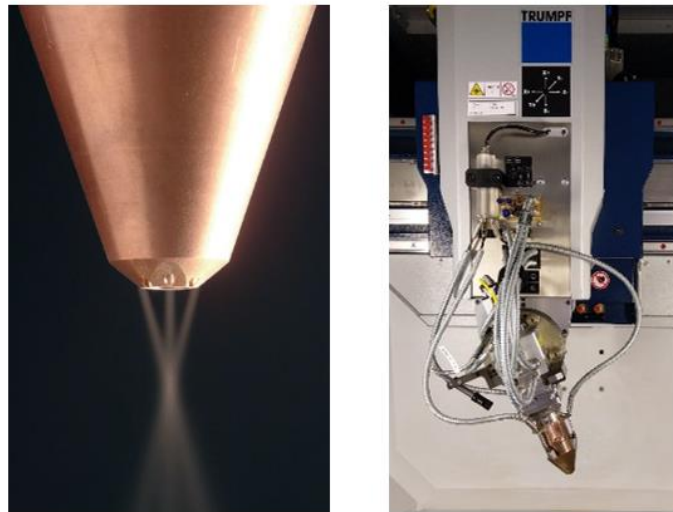
En la figura se puede observar que el orificio central se utiliza para dirigir el láser hacia el sustrato, habiendo un flujo de gas de protección que protege tanto la lente como el láser. A su vez, este orificio es rodeado por una especie de corona por la cual se suministra el polvo metálico junto al gas de arrastre. Este sistema de expulsión de polvo mediante una corona concéntrica permite distribuir el polvo de manera más uniforme y con una mayor fiabilidad que sus respectivas alternativas de varias boquillas distribuidas a lo largo de la periferia del orificio por donde sale el láser. En este sistema, el material se expulsa junto al polvo de arrastre de manera continua y uniforme desde que se enciende el inyector de polvo hasta que se apaga. Por su parte, el flujo de gas hay que interrumpirlo desde su llave de apertura-cierre.

La boquilla está situada en el eje Z de la máquina y mediante el control numérico se puede acercar o alejar del sustrato para modificar el diámetro del spot como convenga.



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

Por otro lado, la boquilla utilizada en la máquina de aporte láser del CFAA es completamente diferente. Estas diferencias vienen impuestas sobre todo por la posibilidad de giro que tiene la propia boquilla, el eje B. Al tener esta posibilidad, no se puede utilizar una boquilla como la descrita anteriormente, ya que al tener una posición que requiera una inclinación, el flujo de polvo no sería uniforme en el punto de aporte. Por eso, se utiliza un sistema de expulsión de polvo de tres inyectores. Estos están repartidos de manera simétrica, a 120° uno del otro a lo largo del círculo que forma la boquilla en su extremo.



*Ilustración 32. Boquilla con inyectores.*

Esta boquilla tiene como especial ventaja la posibilidad de trabajar con inclinación, pero, por otro lado, tiene dos desventajas principales:

- La primera es que se debe tener en cuenta la direccionalidad del flujo ya que, en uno de los ejes, no es igual en el recorrido de ida que en el de vuelta.
- La segunda es la dificultad de aporte en huecos donde el posicionamiento de la boquilla puede provocar que la pieza tape uno de los inyectores y, por tanto, el polvo que se está aportando tiene un caudal menor, resultando en un aporte irregular por falta de material en alguna zona.

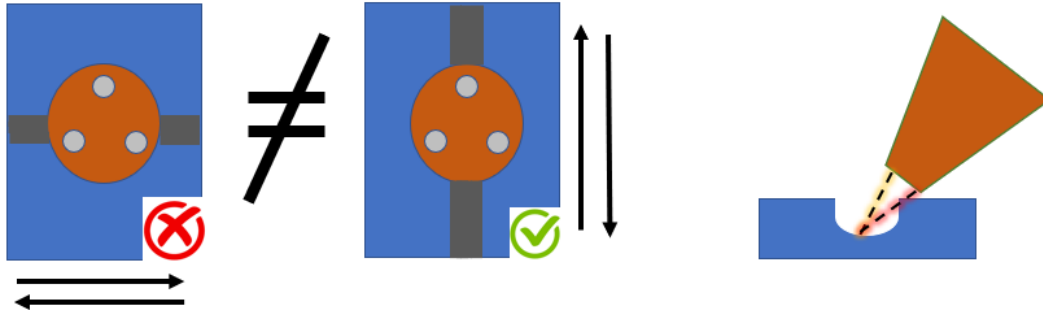


Ilustración 33. Ventajas y desventajas de la boquilla con inyectoros.

### Gas de arrastre y Gas de Protección

En ambos lugares de trabajo se utilizan los mismos gases de arrastre y protección, en este caso, el utilizado para llevar el polvo hacia el punto de fusión como el protector de la lente es el Argón. Estos gases se encuentran almacenados en bombonas de gas comprimido y tienen un accionamiento manual mediante llave. Esta llave se abre y se cierra en el momento que se realizan los aportes y cuando estos terminan.



Ilustración 34. Bombonas de gas Argón.

El gas de arrastre proporciona el impulso necesario al polvo desde el alimentador hasta que es expulsado por la boquilla, procurando no dejar material en el camino. El gas de protección, protege el láser y sus lentes de posibles impurezas o material que pueda dañar alguno de estos elementos.

El argón adquiere especial interés frente a otros gases protectores como el Helio o el Nitrógeno debido a su precio. Este gas, el Argón puro 2X es el más habitual en este tipo de procesos aditivos por su carácter inerte y por ser más económico que las opciones mencionadas. Su pureza es de un 99,998% de Argón [11].

### **Alimentador de Polvo**

Para proporcionar un flujo determinado de polvo al centro de procesamiento láser, se utiliza un alimentador de polvo. Esta máquina proporciona el caudal deseado de polvo ajustando la velocidad del disco alimentador en revoluciones por minuto. A mayor velocidad de giro del disco, mayor será la cantidad de polvo suministrada. Conectada a la máquina, se encuentra el sistema de circulación de gas de arrastre, que es el encargado de impulsar el polvo hasta la boquilla. El polvo se almacena en unos contenedores llamados tolva, donde además de almacenar el material, se deshumidifica con unas camisas calentadoras situadas en su periferia para evitar la compactación del polvo y en consecuencia su posible flujo irregular. Una vez calentado el polvo este se deposita en la ranura del disco, que lo alimenta en función de su velocidad.

El alimentador utilizado en el Taller del Departamento de Mecánica, es un “Sulzer Metco Twin 10-C Powder feeder”. Este alimentador es especialmente interesante por disponer de dos alimentadores que pueden funcionar simultáneamente con dos materiales en polvo diferentes, o simplemente pueden contener dos tipos de polvo para utilizarlos cuando se requieran sin interrumpir el proceso. Además, los discos de las tolvas tienen un ranurado diferente, pudiendo proporcionar un rango superior de caudal de polvo en caso de que fuera necesario. Para este proyecto, no es necesario el uso de polvo de otro material, ya que el recubrimiento se hace solamente de acero AISI H13.

En el taller del CFAA, el alimentador de polvo no es el mismo pero el funcionamiento es similar. Es un “GTV Powder Feeder type PF2/2”. Como el alimentador mostrado antes, también dispone de dos tolvas con sus discos de alimentación, controlado por un PLC de la marca Siemens.



*Ilustración 35. Alimentadores de polvo.*



## Polvo

El polvo es el material que se funde mediante el láser en el sustrato. Este se introduce en el alimentador de polvo y posteriormente se expulsa por la boquilla en dirección al spot del láser. Uno de los aspectos más interesantes del LMD es la gran variedad de materiales en polvo que se pueden utilizar para la fabricación o reparación de piezas. Estos materiales pueden ser tanto metales puros como aleaciones.

La granulometría de estos materiales en polvo suele ser muy pequeña, haciendo que el material deba ser debidamente manipulado ya que su inhalación puede suponer un riesgo para la salud. Muchos de los materiales empleados, como puede ser el titanio, son cancerígenos lo que hace que para la manipulación del polvo se deba utilizar una máscara para evitar inhalarlo.

En este proyecto, se utiliza polvo de acero de herramientas AISI H13 (1.2344) provisto por la empresa *Flame Spray Technologies* y tiene una granulometría de 53-125  $\mu\text{m}$ . Este material provee un buen balance de tenacidad, alta resistencia a la formación de grietas causadas por el choque térmico y resistencia al revenido, junto con resistencia al desgaste moderada. La dureza de este acero se suele encontrar en un rango de 44-52 HRC.

Tabla 1. Composición química del acero en polvo AISI H13.

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	P	Fe
AISI H13	0,39	1,00	0,40	5,20	1,40	0,90	-	-	Bal.

## Sustrato

El sustrato es el material colocado debajo del spot del láser, donde se va a fundir el material en polvo. Esta fusión crea una nueva capa del polvo fundido, mezclado con la parte superior del sustrato también fundida.

A lo largo del proyecto, se trabaja con varios sustratos, de diferente material y espesor. Los materiales empleados son el acero de herramientas AISI H11 (1.2343) y el acero inoxidable AISI 316 (1.4401). El aporte de polvo H13 se realiza sobre el sustrato “pseudo infinito” compuesto por el bloque de H11 sobre el que se quiere recubrir el termopar cuya superficie protectora está compuesta de acero inoxidable, siendo este el sustrato fino. Por tanto, a la hora de realizar el proceso de integración el material en polvo se funde tanto con el bloque ranurado como con la vaina protectora de los sensores.

Tabla 2. Composiciones químicas del acero de herramientas AISI H11 y acero inoxidable AISI 316.

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	P	Fe
AISI H11	0,40	1,03	0,40	5,13	1,35	0,45	-	0,03	Bal.
AISI 316	0,08	0,75	2,00	17,00	2,50	-	-	0,05	Bal.

El acero AISI H11 es un acero de herramientas similar al utilizado en polvo AISI H13. Este sustrato pretende simular los troqueles fabricados en este material. El H11 tiene como características principales su gran resistencia a la fatiga por frío y calor, resistencia a la

corrosión, rendimiento de procesamiento en caliente y en frío y templabilidad. También es resistente a la oxidación, dispone de una alta tenacidad y resistencia al desgaste a temperaturas medias.

El acero inoxidable AISI 316, por su parte, es el encargado de recubrir el interior del cable compuesto por conductores de níquel o cobre y un recubrimiento intermedio aislante de óxido de magnesio. Este acero inoxidable austenítico, contiene un 2,5% de molibdeno, lo que aumenta su resistencia a la corrosión y aumenta su resistencia a altas temperaturas. Es particularmente efectivo en ambientes ácidos.

### **Sierra metalográfica**

Una vez realizados los ensayos, se preparan las muestras para analizarlas microscópicamente. A partir de este punto, todo el proceso se lleva a cabo en el Taller del Departamento de Mecánica.

Para el proceso de corte de las muestras se utiliza una cortadora eléctrica de accionamiento manual y revoluciones constantes. Estos cortes se realizan cuidadosamente ya que se trata de cables de muy poco grosor y se han de obtener muestras delicadamente sin dañar la muestra que posteriormente será encapsulada.



*Ilustración 36. Sierra metalográfica.*

Tanto las muestras de los ensayos de integración del cable como los de parametrización del proceso se obtienen realizando dos cortes con intención de extraer la zona media del ensayo que se considera más representativa a la hora de analizar los resultados.

El corte se hace con el disco de corte adecuado para el material seleccionado. En este caso, se trata de cortar acero AISI H13 sobre el sustrato de acero AISI H11. Estos son aceros de herramientas para los cuales hay que seleccionar un disco de corte FS-D 300A. Este disco, al igual que los del tipo FS-D están hechos para trabajar con aceros duros de entre 40-60 HRC. El cable está compuesto también por una vaina de acero inoxidable AISI 316, aislante de óxido de magnesio y conductores de níquel o cobre, pero el disco de corte se selecciona teniendo en cuenta los aceros ya que la proporción de material es mayor y además es su unión el objetivo a analizar posteriormente. Por eso, es esa parte la que más cuidadosamente se debe obtener y con la mayor calidad posible.



Ilustración 37. Disco de corte FS-D 300A.

## Encapsuladora

Las muestras cortadas, se encapsulan después para obtener unas probetas con sección plana que se observarán finalmente en el microscopio. Para obtener estas probetas, se introduce la muestra cortada previamente en la sierra.

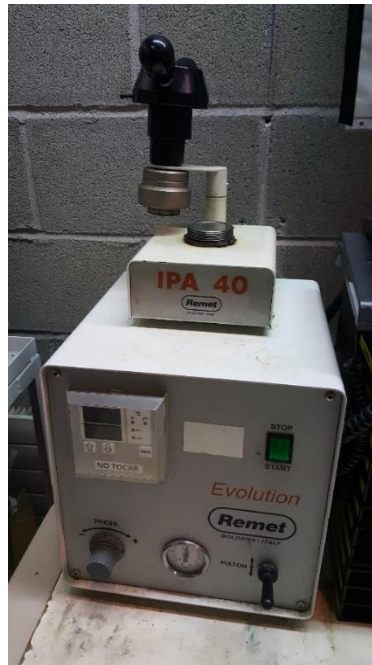
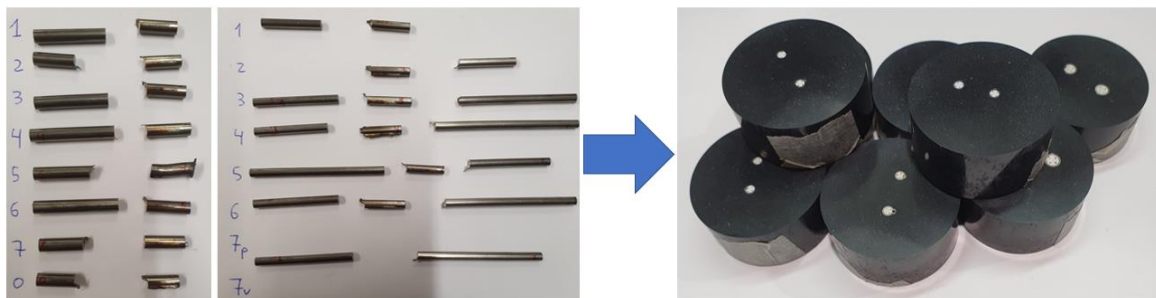


Ilustración 38. Encapsuladora.

El proceso de encapsulado se inicia con la máquina apagada y el pistón en la parte superior.

- La muestra se coloca en ese pistón, con la cara que se quiere observar en el microscopio en contacto con el pistón.

- Una vez colocada la muestra, se baja el pistón y se introduce la resina en grano. Este proceso tiene una pequeña dificultad ya que la resina hay que esparcirla poco a poco mientras el pistón va bajando, debido a las pequeñas dimensiones de la muestra. Ante un pequeño golpe del grano de resina a la muestra, esta se puede torcer o caer, teniendo que realizar el proceso de nuevo desde el inicio. La cantidad de resina introducida es de 50 ml ya que la muestra introducida ocupa una muy pequeña proporción de la probeta y en caso de falta de resina, el pistón no proporciona una superficie plana adecuada.
- Introducida la resina, se cierra el cilindro con fuerza y se enciende la máquina, accionando la subida del pistón ya que este se encuentra en la parte baja del cilindro.
- Para derretir la resina en grano, la máquina debe llegar a una temperatura establecida, de consigna. Este proceso requiere una cantidad de tiempo ya que la máquina se calienta de una temperatura de 35°C aproximadamente cuando se enciende, hasta la de consigna de 150°C aproximadamente.
- Cuando la máquina llega a la temperatura de consigna, termina su proceso y la temperatura desciende paulatinamente hasta la inicial. Este descenso se inicia con un pitido que avisa de que ha llegado a la temperatura deseada.
- Por último, con la temperatura de inicio se extrae la probeta debidamente encapsulada y se procede a pulir la cara en la que se ven las muestras.

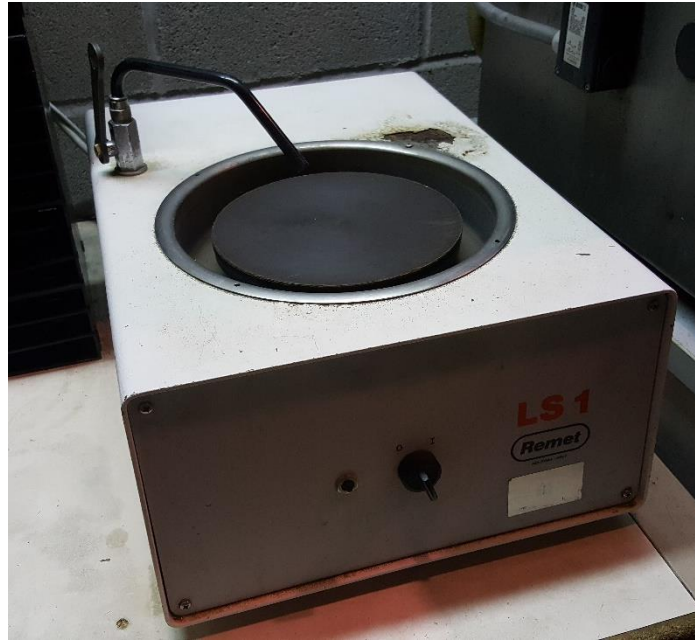


*Ilustración 39. Proceso de encapsulado de secciones.*

Este proceso requiere de tiempo ya que hay que esperar a que la máquina alcance la temperatura de consigna y descienda a la inicial posteriormente. Este proceso puede durar unos 15-20 minutos. Para optimizar el tiempo invertido en el proceso de preparación de muestras, estas se encapsulan a la vez que se van cortando más muestras ya que ambas máquinas comparten espacio de trabajo. Además, se aprovecha al máximo el espacio en la cápsula introduciendo dos piezas en la misma probeta al mismo tiempo dentro de lo posible. De esta manera, se ahorra una cantidad considerable de tiempo ya que se evitan tiempos de espera únicamente, reduciendo el tiempo de encapsulado prácticamente a la mitad al encapsular dos muestras a la vez y realizando más cortes o puliendo alguna probeta ya encapsulada previamente al mismo tiempo.

## Pulidora

En el mismo recinto de trabajo, entre las dos máquinas ya utilizadas, se dispone de una pulidora metalográfica manual que permite pulir las caras planas de las probetas y obtener una cara de la muestra válida para su posterior análisis en el microscopio. Esta máquina es muy sencilla de utilizar, la parte más complicada es la distribución de la fuerza en la probeta de manera manual.



*Ilustración 40. Pulidora.*

La máquina se utiliza de esta manera:

- Primero se coloca la lija o paño deseado en la superficie circular en el centro de la pulidora. Esta lija o paño se adhiere a esa superficie por contacto ya que existe atracción magnética entre ambas.
- Después se acciona el grifo para que de él salga un ligero caudal de agua. Para ello hay que tener en cuenta la alimentación de agua a la máquina, que debe estar abierta.
- Se enciende la pulidora para que la superficie central comience a girar a revoluciones constantes, enfocando la caída del agua cerca del centro para que al girar esta se distribuya uniformemente.
- Por último, se coloca la cara a pulir en contacto con la lija en una posición fija, variando un poco de manera radial y se realiza una fuerza uniforme para crear una cara pulida plana. Una vez la cara tenga un acabado superficial uniforme, se cambia de lija a otra con un tamaño de grano mayor y se realiza el mismo proceso girando la probeta 90 grados para lijar en una dirección perpendicular.



## Lijas y Paños

Para pulir las probetas se utilizan lijas y paños, en ese orden. Primero se sitúan las lijas metálicas de diamante, de un tamaño de grano menor a uno mayor progresivamente. Estas lijas comienzan con un tamaño de grano de 80  $\mu\text{m}$ , pasando por los tamaños de 220  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$  y 1200  $\mu\text{m}$ . Son fácilmente identificables gracias a los diferentes colores de los que están compuestos. Estas lijas son reutilizables, siempre que su cuidado sea adecuado. Hay que lavarlas tras su uso con agua a presión y dejarlas secando después para su correcto mantenimiento.



*Ilustración 41. Lijas de diamante.*

Después de lijar, hay que pulir las probetas para obtener un acabado tipo espejo que después se atacará antes de realizar el análisis microscópico. El proceso de pulido es muy similar al de lijado, con la diferencia de los elementos a utilizar. El caudal de agua se estrangula hasta que solo sea de unas pocas gotas para los primeros paños, para el último no hace falta agua.

En este caso se utilizan paños en vez de lijas. Estos elementos también son reutilizables, pero son bastante más delicados que las lijas. Hay que lavarlos antes y después de su uso, evitando en la manera de lo posible la contaminación del paño con otras impurezas que puedan rayar la superficie de la probeta. Una vez lavado el paño, a este se le añade un aerosol de diamante de diferente tamaño de grano, uno diferente por cada paño. Estos aerosoles son de 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  y se aplican en ese orden. Se utiliza un paño ya establecido para cada spray de diamante, para evitar producir contaminaciones de otros aerosoles en el mismo paño. Con el paño colocado ya en la pulidora, se aplica el spray una o dos veces desde el centro hacia el exterior y se comienza a pulir.



*Ilustración 42. Paños y sprays de diamante.*

A diferencia del proceso de lijado, en este caso no se sujeta la probeta en una misma posición durante el pulido, sino que se mueve por la superficie del paño con mayor libertad. Además, en el último paño se mueve la probeta en círculos de forma horaria para pulir la muestra en todas las direcciones posibles.

A lo largo de este proceso es muy importante el uso de guantes y la constante limpieza de los paños como ya se ha advertido anteriormente. Cualquier partícula contaminante puede retrasar el pulido de las probetas rayando la superficie de la muestra. Si esto sucede, hay que volver a una etapa anterior, cambiando de paño o lija, limpiando ambos y volviendo a obtener una superficie plana y uniforme con la lija o paño anterior.

Para terminar de utilizar los paños, se lavan con agua intensamente y se colocan en un escurridor junto a las lijas para su correcto mantenimiento.

### **Ataque**

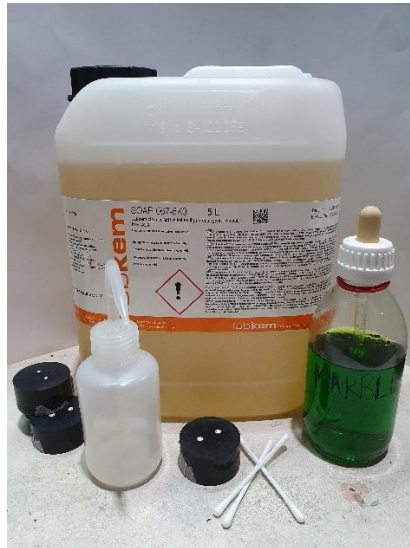
Cuando se obtiene el pulido tipo espejo, se ataca químicamente la pieza para lograr ver de manera clara la diferencia de materiales a la hora de analizar las micrografías. Para este proceso es totalmente necesario el uso de guantes y gafas de protección, ya que el líquido utilizado para el ataque puede ser perjudicial en caso de contacto con la piel y en el peor de los casos, con los ojos.

El proceso de ataque se realiza de la siguiente manera:

- Primero se procede a lavar la superficie pulida de la probeta con un jabón especial para el lavado de las mismas. Se lava la probeta con agua a presión, después se introduce la cara pulida en un recipiente que contenga este líquido y se frota suavemente la superficie pulida. Finalmente se vuelve a lavar con agua a presión para

expulsar todo resto de jabón y se aplica un chorro de alcohol isopropílico, caracterizado por su rápida evaporación, que permite una eliminación eficaz del agua en la superficie.

- Una vez lavada la probeta, se adquiere una pequeña porción del Marble con el extremo de un bastoncillo y se aplica en la superficie de la muestra suavemente durante un breve periodo de tiempo para que esta no se quemé en exceso.
- Tras dos o tres segundos de aplicación del ataque, se vuelve a lavar con agua a presión para neutralizar el ataque y se seca de manera similar al paso anterior, con aire a presión enfocado en el centro de la probeta, a cierta distancia.



*Ilustración 43. Materiales utilizados en el proceso de ataque químico.*

Este proceso se sigue con todas las probetas antes de proceder a su análisis. Cabe resaltar la importancia del uso de protección en este proceso, al igual que su posterior limpieza y deshecho de residuos con especial cuidado y precaución. En este caso, tanto el jabón restante como el Marble se lavan concienzudamente en agua, sobre todo con el ataque para neutralizarlo y no dejar ningún resto que pueda ser perjudicial para la salud.

### **Microscopio**

El paso final para analizar la microestructura de las muestras es la obtención de las imágenes de la superficie con el uso del microscopio. Este dispositivo es un Leica DCM 3D, del que dispone la Sala de Metrología del Departamento de Mecánica. El microscopio proporciona unas fotos con una gran resolución y de una amplia variedad debido a sus objetivos con diferentes enfoques incorporados.





*Ilustración 44. Microscopio Leica DCM 3D*

El microscopio y sus componentes, son muy delicados y su uso debe ser adecuado. El conjunto dispone de un microscopio regulable en altura, una gama de objetivos de diferente focal y una mesa neumática regulable en todo momento para mantener una superficie plana de cara al objetivo en todo momento, a pesar de las fuerzas externas. A su vez, este está conectado a un ordenador situado a su lado en el mismo puesto de trabajo y un joystick que permite realizar con fluidez los movimientos sensibles de la mesa de posicionamiento del microscopio, la regulación en altura del cabezal y el enfoque de los objetivos en todo momento.

Mediante un programa llamado LeicaSCAN ejecutado en el ordenador, se visualiza en la pantalla la imagen obtenida mediante el microscopio y con las diferentes opciones que ofrece el programa y con su correcto uso, se obtienen todas las imágenes necesarias para un correcto análisis de la superficie.

Se obtienen varias imágenes por cada probeta y muestra, compuestas por imágenes de toda la muestra, de la zona del cordón y en el caso de que sea necesario, de algún detalle de la muestra. Comenzando con una lente de enfoque x5 se consiguen las imágenes más genéricas del cordón, de la unión o de todo el cable en conjunto. Aumentando enfoque a x10 se obtienen imágenes más concretas de las zonas que se quieren analizar. Por ejemplo, este es el enfoque utilizado para las fotos de los cordones. Por último, se utiliza el objetivo x20 para destacar algún detalle de especial interés en la muestra correspondiente.

Todas estas imágenes se guardan en archivos que posteriormente se medirán en otro programa llamado LeicaMAP donde se obtienen los parámetros finales que se buscaban desde el principio.

Ambos programas necesitan licencias específicas para su uso y este debe ser notificado cada vez que se quiera usar el dispositivo de medición.

## 6. Metodología

El proyecto “Integración de sensores en útiles de troquelería mediante aporte por láser” trata de estudiar la integrabilidad de sensores de temperatura en herramientas de troquelería como matrices mediante la tecnología de fabricación aditiva LMD. Pretende también determinar el diámetro más pequeño posible a integrar y optimizar los procesos de aporte en caso de que estos se puedan realizar. Por ello, para dar comienzo a este proyecto, se realiza una investigación correspondiente a cada una de las partes que intervienen en el proceso de integración. Se investiga y recopilan datos sobre fabricación aditiva LMD, sensorización con termopares, aporte en chapa fina, los procesos de estampación en caliente y sus necesidades, y la materia prima con la que se va a realizar el proyecto de investigación, sus características y cualidades a la hora de fundirlos con el láser.

El gas utilizado es el argón, tanto como gas de arrastre como de protección. El argón es el elemento más común en los procesos de aporte por láser y por las características que presenta, es adecuado para realizar los ensayos. En lo que a la geometría del sustrato se refiere, se utilizan diferentes sustratos a lo largo de los ensayos del proyecto. Para los ensayos de integración, se utilizan sustratos de acero AISI H11 ranurados con el hueco justo para apoyar sobre ellos los cables de aislamiento mineral que simulan a los termopares. En cambio, para los ensayos de caracterización los sustratos son las propias cubiertas de acero inoxidable AISI 316 donde se aporta un cordón de acero AISI H13 en la parte superior de la cubierta circular.

A la hora de realizar la integración se produce un aporte sobre dos materiales diferentes, por eso, se realiza un estudio más exhaustivo sobre las características y propiedades de los mismos, sumando la dificultad del reducido espesor de la cubierta de inoxidable y el problema de difusión de calor que esto supone. Tras encontrar la información necesaria en artículos de investigación de procesos relativamente similares y dar el visto bueno a los materiales empleados, se pone en marcha el proyecto en el taller del Departamento de Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.



*Ilustración 45. Escuela de Ingeniería de Bilbao UPV/EHU.*

## **6.1 Planificación**

Una vez obtenida la información necesaria, se decide el procedimiento a seguir, las estrategias a utilizar y las etapas a completar para conseguir los objetivos establecidos. Con esto, da comienzo el proyecto.

Lo primero es la decisión de optar por cables con aislamiento mineral de diferente diámetro para simular los aportes sobre los termopares, ya que estos son más baratos. Después se realizan unos ensayos preliminares para determinar un solape válido de las capas para aportar polvo AISI H13 sobre los cables y crear una capa que cubra la cubierta del cable de acero AISI 316. Los ensayos se realizan sobre el sustrato únicamente, con intención de concretar potencia, avance y caudal másico necesarios para realizar los aportes.

Tras comprobar estos primeros datos obtenidos de los primeros aportes, se deciden las estrategias de aporte a emplear, que en este caso serán dos. Esto es debido al fino espesor sobre el que se aporta y las dificultades de evacuación de calor que supone la aplicación de energía sobre la cubierta. Se pretende calificar la viabilidad de ambas estrategias y cuál se adapta mejor a las necesidades de aporte.

Finalmente, y definir las estrategias, se realiza la integración sobre los cables con aislamiento mineral con las dos estrategias. Por lo tanto, se plantea una serie de ocho ensayos, teniendo en cuenta los cables de diferente tamaño y las estrategias empleadas. Esta variedad de ensayos servirá después para el análisis de las microestructuras en una variedad de muestras, con lo que será más fiable valorar los resultados obtenidos al tener diferentes casos y condiciones para analizar.

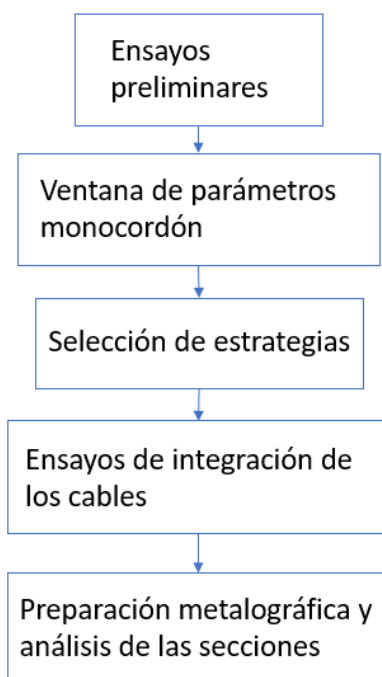


Ilustración 46. Diagrama de flujo I.

## 6.2 Preparación previa a los ensayos de integración I

Antes de comenzar con los ensayos de integración, se han de superar varias etapas y preparar los escenarios correspondientes. Por una parte, es necesario determinar los parámetros con los que se va a trabajar, ya sean para configurar el láser como el solape entre capas para lograr un buen recubrimiento, obtenidos de los ensayos preliminares.

De esta forma, se han ensayado distintos solapes que permitan obtener capas de material homogéneas y libres de defectos. Los parámetros empleados y la caracterización geométrica de los cordones únicos vienen recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 3. Parámetros de aporte y caracterización geométrica de cordones únicos.

Parámetros de aporte de AISI H13 sobre AISI H11					
Potencia, P [W]		Avance, F [mm/min]		Caudal másico, M [g/min]	
700		450		4,5	
Caracterización geométrica					
Alto [mm]	Ancho [mm]	Penetración [mm]	Ángulo de mojado [°]	Dilución [mm]	Alto/ancho [-]
0,4	1,6	0,41	42,6	0,52	0,25

Se han realizado ensayos con un 20%, 30%, 40%, 50% y 60% de solape, y se han estudiado la penetración en el sustrato y su afectación térmica. Se ha determinado el solape óptimo que permite obtener capas de material sin defectos aparentes, y que asegure una unión metalúrgica sólida entre aporte y sustrato. Este es el solape del 30% entre cordones, suficiente para asegurar un correcto llenado del aporte, sin ser perjudicial. Un solape mayor condicionaría la unión entre cordones y sustrato. La metalografía correspondiente al solape

óptimo se muestra en la siguiente figura, donde a su vez, se recogen los resultados de los ensayos de solape realizados. Se observa que un solape del 30% entre cordones permite obtener capas de altura constante en las que, además, se asegura una correcta unión con el sustrato, manteniendo una profundidad del orden de 0,2 mm.

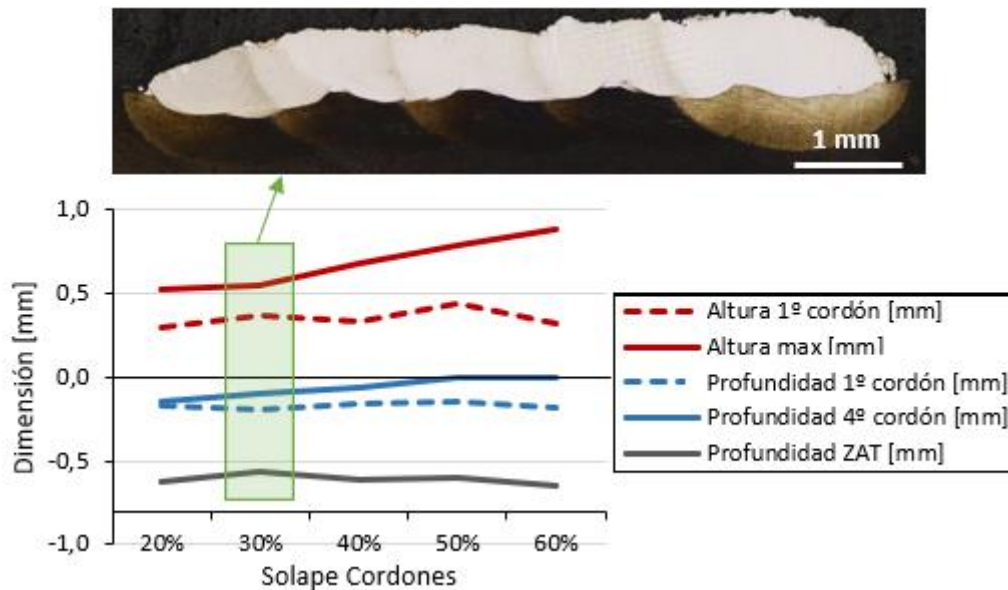


Ilustración 47. Solape óptimo y resultados obtenidos de los ensayos.

Por otra parte, se han depositado una serie de cordones únicos sobre sustrato tubular de AISI 316 con el objetivo de replicar el aporte sobre los cables. Además, para disminuir la penetración de los cordones sobre el sustrato se ha variado el avance y el caudal másico de polvo, como se muestra en la siguiente tabla, reduciendo así el aporte energético durante el proceso de aporte.

Tabla 4. Parámetros de aporte para ensayos sobre tubo de AISI 316.

Nº Cordón	P [W]	F [mm/min]	M [g/min]	P/F [W.min/mm]	P/M [J/g]
1	700	450	4,5	1,550	9333
2	700	500	5,0	1,400	8400
3	700	550	5,5	1,270	7363
4	700	600	6,0	1,167	9333
5	700	650	6,5	1,077	6461

En este caso, no se han percibido grandes variaciones en la geometría de los cordones aportados, ya que todos han presentado una morfología similar. Esto se debe probablemente a que la ventana de parámetros analizada no es lo suficientemente amplia como para que la geometría de los cordones se vea afectada. Se observa que para todos los casos la penetración en el sustrato es del orden de 0,2 mm y, por tanto, menor que el espesor de la cubierta de los cables de aislamiento mineral a integrar.

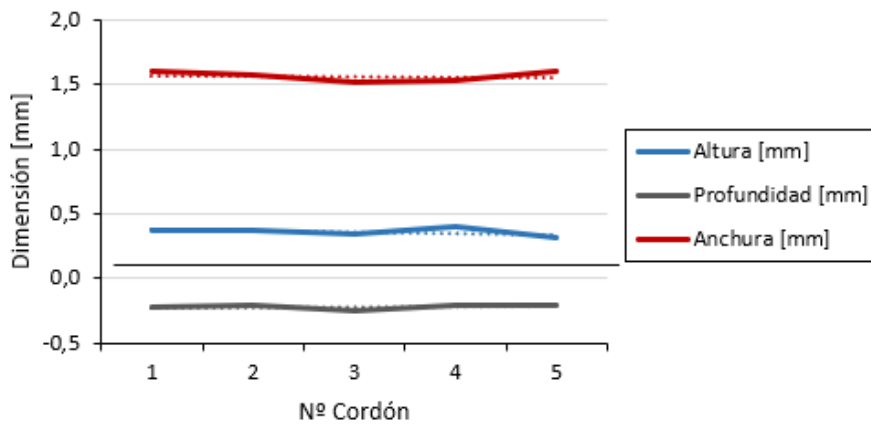


Ilustración 48. Caracterización geométrica de los cordones de AISI H13 sobre sustrato tubular de AISI 316.

**Ensayos de solape de AISI H13 sobre AISI H11**



**Ensayos de AISI H13 sobre tubo de AISI 316**

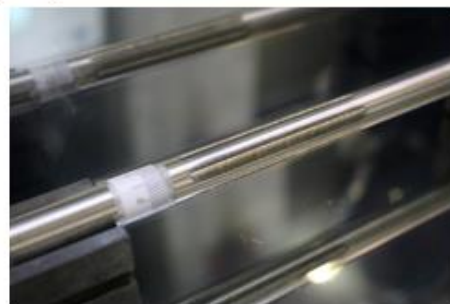


Ilustración 49. Ensayos preliminares realizados.

**6.3 Ensayos de integración de cables con aislamiento mineral I**

Una vez obtenidos los parámetros adecuados de solape sobre el sustrato y analizados los resultados de los monocordones sobre los cables, se realizan los ensayos de integración de cables con aislamiento mineral con dos estrategias diferentes. Debido a la geometría circular del cable, es necesario, o al menos conveniente, emplear trayectorias programadas en 5 ejes como parte de la estrategia de aporte. Además, debido al pequeño espesor de la cubierta de los cables, debe emplearse una estrategia que favorezca la evacuación del calor, ya que el sustrato tiene una capacidad muy limitada de disipación. De esta forma, se propone emplear unas trayectorias en las que se hace uso de la función de seguimiento de punto del control numérico, de forma que se asegure una correcta orientación de la boquilla de aporte respecto del sustrato, tal y como se muestra en la siguiente figura.



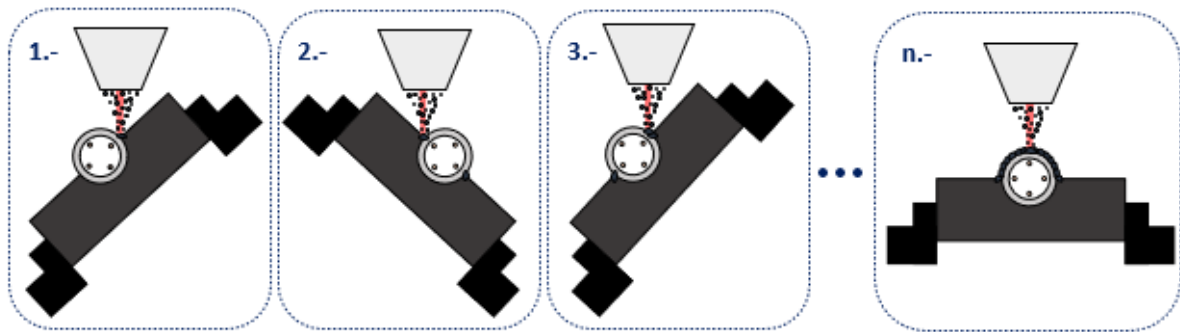


Ilustración 50. Estrategia de aporte empleada.

Además, con el objetivo de evitar colisiones entre la boquilla y las garras del plato divisor introducido para las trayectorias en 5 ejes, se ha introducido un coeficiente corrector del ángulo de inclinación de la boquilla, que se va reduciendo iterativamente a medida que se aportan cordones a lo largo del cable. En consecuencia, el aporte de los primeros cordones no se ha realizado con la boquilla de aporte perpendicular a la superficie del cable.

### 6.3.1 Ensayos de integración de cables con aislamiento mineral: Estrategia 1

Con esta estrategia, se aportan cordones de 20 mm de longitud debidamente solapados con los parámetros de aporte mostrados en la tabla 5. Con el objetivo de mejorar la disipación de calor, se han aportado los cordones alternativamente en los lados izquierdo y derecho del cable, empezando por la unión entre cubierta y sustrato y terminando con el aporte del cordón de cierre en la parte superior de la cubierta, tal y como se muestra en la secuencia de la Figura X. Siguiendo esta misma estrategia, se han aportado las capas superiores hasta obtener un recubrimiento de 2 mm. Destacar que se ha introducido una espera entre capas para asegurar una correcta evacuación del calor y evitar que sobrecalentamientos del sustrato y material depositado puedan afectar al proceso.

### 6.3.2 Ensayos de integración de cables con aislamiento mineral: Estrategia 2

La segunda de las estrategias es exactamente igual respecto a las trayectorias, el solape y la longitud de cordones que la primera planteada anteriormente. La diferencia destaca en la reducción de aporte energético con el fin de minimizar la penetración de los cordones en las cubiertas de los cables. Para ello, se ha reducido la potencia de 700 W a 500 W en las dos capas iniciales y, además, se ha introducido un tiempo de espera entre cordones de 30 s, para posibilitar la evacuación de calor y disminuir la temperatura inicial del sustrato y aporte previo.

Tabla 5. Parámetros de aporte de las estrategias 1 y 2.

Parámetros estrategia 1				
Potencia, P [W]	Avance, F [mm/min]		Caudal másico, M [g/min]	
700	450		4,5	
Parámetros estrategia 2				
Potencia capas 1 y 2 [W]	Potencia capa 3 [W]	Avance, F [mm/min]	Caudal másico, M [g/min]	Tiempo de espera entre cordones [s]
500	700	450	4,5	30



### **6.3.3 Comprobación de la continuidad en los conductores de los cables de aislamiento mineral**

Una vez concluido el recargue de los cables de aislamiento mineral, se ha comprobado la continuidad de cada uno de los conductores que constituyen el mismo empleando un multímetro. De esta forma, se puede comprobar si los conductores del cable han resultado dañados durante el proceso de aporte.

### **6.4 Obtención de resultados I**

Con el objetivo de estudiar la calidad de los aportes realizados, se han obtenido muestras de dos secciones transversales de cada uno de los aportes. Estas secciones, se obtienen utilizando la sierra metalográfica disponible en el taller, con un disco de corte de acero duro FS-D 300A.

Tras obtener las secciones, estas se han encapsulado en caliente en la encapsuladora durante un tiempo aproximado de entre 20 – 30 minutos y han sido lijadas y pulidas siguiendo un procedimiento de preparación metalográfica estándar, es decir, pulidas primero con las lijas de diamante y pasadas por un paño de spray de diamante posteriormente. Por último, se han atacado químicamente con el reactivo Marble para poder analizar la microestructura, la zona afectada térmicamente alrededor del cordón y los límites de cada cordón.

Como paso final para la obtención de resultados, se observa la superficie atacada con el microscopio Leica DCM 3D, realizando diferentes capturas de las zonas más interesantes a observar y analizar.

### **6.5 Planificación II**

Tras la primera fase de realización y análisis de los ensayos de integración de conductores de aislamiento mineral mediante aporte por láser o LMD y para los casos estudiados, se ha determinado que la integración es posible en los cables de diámetro Ø8 mm y Ø6 mm, mientras que los cables de Ø4,5 mm y Ø3 mm han sido parcial o totalmente perforados. Por lo tanto, es necesario realizar una serie de ajustes en los parámetros de aporte y en la programación de trayectorias para modificar y solucionar en la medida de lo posible los problemas encontrados en los cables de menor diámetro.

Debido al reducido espesor de la cubierta de AISI 316 que protege los conductores, es necesario realizar un ajuste de los parámetros de referencia para reducir así el aporte energético aplicado en los ensayos. De este modo, se pretende evadir la perforación del cable ya que la fina superficie tiene una capacidad menor para disipar el calor generado durante el proceso de aporte que en el caso de los cables de diámetro Ø6 y Ø8 mm. Sin embargo, es necesario mantener un aporte energético mayor en las zonas de unión entre sustrato y cubierta para asegurar una correcta unión entre elementos.

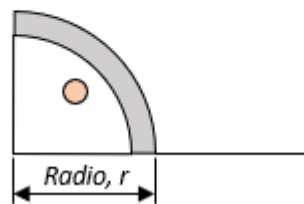
Por otro lado, también se detectan faltas de fusión entre cordones. Un solape insuficiente, o una distancia entre cordones excesiva, es la causa de las faltas de fusión detectadas en los aportes realizados. En el caso de la estrategia 2, es necesaria una recharacterización del material, ya que, al modificar los parámetros de aporte, también se modifica la geometría de

los cordones y, por tanto, el solape entre ellos debe ser reajustado. En cualquier caso, también se han detectado faltas de fusión en los aportes realizados con la estrategia 1, en la que los aportes eran realizados de acuerdo a la parametrización presentada en el apartado de ensayos preliminares. Esto se debe a que en la programación de trayectorias hay una serie de aproximaciones por las cuales se modifica la distancia entre cordones empleada respecto a la teóricamente optimizada.

En la ilustración mostrada a continuación, se recogen los cálculos realizados por el programa para ajustar el número de cordones al perímetro del cable a aportar donde,  $d_{cordones}$  es la distancia entre cordones teórica,  $n_{cordones}$  es el número de cordones a aportar en un cuarto del cable,  $\alpha_{cordones}$  es el ángulo entre cordones sucesivos y  $d_{cordones, real}$  la distancia entre cordones real. Debido al redondeo a número entero destacado en rojo en la ilustración, el solape varía en función del diámetro de la curvatura de la superficie sobre la que se recarga. En la tabla 6, se recoge el caso de los aportes realizados y se calcula el solape real empleado por el programa. Cabe destacar que este solape cambiará en cada capa aportada, pudiendo resultar en un solape excesivo o insuficiente.

**Cálculo de la distancia entre cordones teórica**

$$d_{cordones} = (1 - \text{solape}) \cdot \text{ancho}_{cordón}$$



**Cálculo de la distancia entre cordones en la programación CNC**

$$d_{aporte} = \frac{\pi \cdot r}{2}$$

$$n_{cordones} = \text{ROUND} \left( \frac{d_{aporte}}{d_{cordones}} \right)$$

$$\alpha_{cordones} = \frac{90^\circ}{n_{cordones}}$$

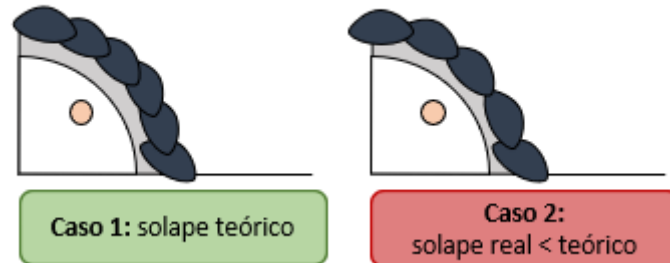
Ilustración 51. Cálculos realizados por el programa de trayectorias.

En definitiva, se observa que, en función del radio de curvatura de la superficie a recargar, y siguiendo la estrategia utilizada para la programación de trayectorias se incurre en un error de solape considerable, de forma que pueden aparecer fallos asociados a este parámetro, tales como las faltas de fusión ya mencionadas. En la siguiente ilustración se representa gráficamente este error.

Al realizar el ajuste del número de cordones para poder cubrir un cuarto de la circunferencia partiendo de la unión entre sustrato y cubierta y terminando en la vertical, el solape real excede al teórico, representado en el esquema de la izquierda.

Tabla 6. Cálculo de solape real para cada caso.

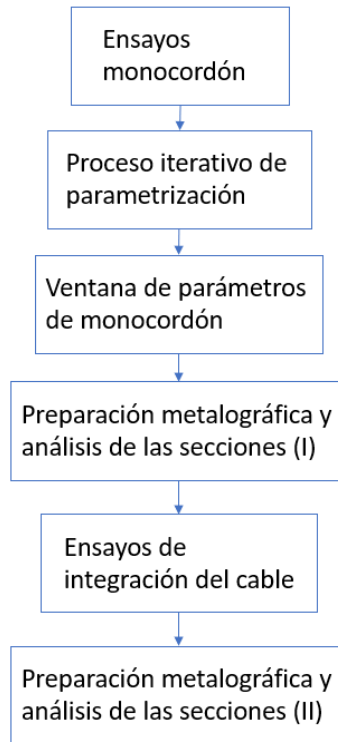
Caso	daporte [mm]	ncordones	αcordones [°]	dcordones, real [mm]	solapereal [%]
∅3	2,36	2	45	1,18	26,25
∅4,5	3,53	3	30	1,18	26,46
∅6	5,11	5	18	1,02	36,19
∅8	6,28	6	15	1,05	34,55



*Ilustración 52. Representación gráfica del error de solape cometido en la programación de trayectorias.*

Para solventar esta problemática, se plantea una nueva estrategia que consiste en mantener un solape constante a lo largo de las capas aportadas, variando ligeramente el número de cordones aportados a lo largo del perímetro del cable. Además, al igual que en la estrategia de programación de trayectorias empleada, partir de la unión entre sustrato y cubierta, pero en lugar de calcular el ángulo entre cordones ajustándose a un número entero, calcular el ángulo real que daría una distancia entre cordones teórica y, al llegar a la zona superior, aportar un cordón de cierre en la vertical, asegurando que no hay una carencia de material en esa zona.

Una vez definida la nueva estrategia a utilizar en los próximos ensayos de integración del cable se configuran también los ensayos necesarios de caracterización de monocordones para recalculan el solape necesario posteriormente en la integración, y para definir una ventana de parámetros óptimos para realizar los aportes en los cables de menor diámetro sin perforarlos ni perjudicar su integridad metalúrgica.



*Ilustración 53. Diagrama de flujo II.*

## 6.6 Ensayos de parametrización y caracterización del material

Antes de llevar a cabo una nueva estrategia de integración de sensores, se ha decidido realizar una nueva parametrización con el objetivo de encontrar los parámetros de aporte que faciliten la disipación de calor en los sustratos finos de los cables de  $\varnothing 4,5$  mm y de  $\varnothing 3$  mm. Para ello se realizan unos ensayos de parametrización donde se pretende ajustar una ventana de parámetros válidos para realizar un aporte en los sustratos previamente mencionados sin deteriorar la superficie protectora del cable y utilizar estos nuevos valores a posteriori cuando haya que cubrir el cable mediante sucesivas capas.

Debido a la geometría circular del cable, es necesario emplear trayectorias programadas en 5 ejes como parte de la estrategia de aporte. La diferencia principal respecto a los parámetros utilizados anteriormente, es la modificación de la potencia ( $W$ ) y avance ( $F$ ) para disminuir el aporte energético y favorecer la evacuación del calor ya que el sustrato es tan fino que presenta dificultades importantes a la hora de disipar el calor.

Al ser el objetivo encontrar una horquilla de parámetros válidos de aporte y los anteriores parámetros de referencia empleados en los cables de diámetro 6 mm no proporcionan resultados válidos, se realiza un proceso iterativo de prueba y error basándose en los parámetros anteriores, pero sin ser estos los mismos.

Una vez obtenidos unos parámetros con los que no se perjudica la integridad metalúrgica de la cubierta del cable, se ha ajustado una ventana de parámetros con los cuales se definen los ensayos a realizar para caracterizar los monocordones.

Para ello, se ha aplicado una potencia máxima de 500 W para el cable de  $\varnothing 4,5$  mm de diámetro y se ha reducido a 300 W la del cable de  $\varnothing 3$  mm.

Tabla 7. Parámetros de aporte para los ensayos de caracterización de los monocordones

Cables de 4,5 mm

Ensayo	P [W]	F [mm/min]	Energía específica (J/mm <sup>2</sup> )
1	450,00	450,00	50,00
2	400,00	450,00	44,44
3	350,00	450,00	38,89
4	300,00	450,00	33,33
5	500,00	500,00	50,00
6	500,00	562,50	44,44
7	500,00	642,86	38,89

Cables de 3 mm

Ensayo	P [W]	F [mm/min]	Energía específica (J/mm <sup>2</sup> )
1	150,00	450,00	16,67
2	200,00	450,00	22,22
3	250,00	450,00	27,78
4	300,00	450,00	33,33
5	300,00	900,00	16,67
6	300,00	675,00	22,22
7	300,00	540,00	27,78

Con estos nuevos parámetros, la potencia se ve reducida en un grado mayor, al igual que la velocidad de avance aumenta de manera considerable para lograr aportes de energía menores. El ensayo número 8 se descarta por ser el mismo que el número 4, por lo tanto, este se ha realizado una única vez.

### 6.7 Obtención de resultados II

Al igual que en los ensayos anteriores, se seguirá un procedimiento de preparación metalográfica estándar: El primer paso será cortar todos los monocordones y obtener una sección que contenga la parte media del aporte donde los resultados serán más fiables que al inicio o al final del cordón.



Ilustración 54. Cortes de los monocordones de diámetro Ø4,5 mm y Ø3 mm.

Cabe destacar que en el ensayo nº7 de los cables de diámetro Ø3 mm se obtienen dos secciones de interés debido a su irregularidad, creando así las probetas nº7–pico y nº7–valle. Todas estas secciones se encapsularán en caliente, para después lijar y pulir la superficie a observar y finalmente se obtendrán mediante el microscopio confocal las imágenes de las microestructuras de las probetas.

La diferencia respecto al caso anterior, es que en este caso se realizará un análisis de la microestructura con el programa LeicaMAP con el que se determinarán las características de cada uno de los cordones para analizar más exhaustivamente, la altura, anchura, penetración y ángulo de mojado para cada uno. Con estos datos se determinarán finalmente los cordones válidos para la integración del cable con la estrategia planteada.

## 6.8 Ensayos de integración de cables con aislamiento mineral II

Tras obtener las horquillas de parámetros que proporcionan un buen aporte de material AISI H13 sobre la vaina protectora de AISI 316, se procede a realizar un análisis de trayectorias que permita calcular el número de cordones necesarios a aportar a lo largo del perímetro del cable a integrar en el sustrato de AISI H11. Este análisis se realiza mediante el programa NX de Siemens y con él se obtienen los cordones que se aportan uno tras otro a lo largo del cable, la distancia que debe haber entre cordones y el solape entre los mismos.

En esta ocasión, se ha optado por seguir una estrategia diferente, mantener el solape constante aun variando ligeramente el número de cordones aportados a lo largo del perímetro del cable. Con este solape constante se pretende solucionar la falta de fusión entre cordones, mientras que la falta de unión entre cubierta y sustrato se soluciona con la nueva parametrización de los aportes.

Por lo tanto, se han realizado los aportes sobre los cables con aislamiento mineral de  $\varnothing 4,5$  mm y  $\varnothing 3$  mm de diámetro con la alternativa de mantener el solape entre cordones, a partir de los parámetros de los cordones validados en los ensayos de parametrización y caracterización del material, aumentando la potencia a medida que se aporta un mayor número de capas. De esta manera se han aportado tres capas sobre los cables de diferente tamaño con los parámetros mostrados a continuación.

Tabla 8. Parámetros de recubrimiento del cable de diámetro  $\varnothing 4,5$  mm.

Parámetros base - Ensayos de recubrimiento de cable de aislamiento mineral - $\varnothing 4,5$ mm						
P [W]	F [mm/min]	$\dot{m}$ [g/min]	RPM [%]	Altura [mm]	Anchura [mm]	Penetración [mm]
300	450	3,242	1,013457653	0,3436	1,1616	0,2739

Parámetros del recubrimiento				
	P [W]	F [mm/min]	$\dot{m}$ [g/min]	RPM [%]
1	300	450	3,242	1,01345765
2	300	450	3,242	1,01345765
3	400	450	3,242	1,01345765
4	400	450	3,242	1,01345765
5	500	450	3,242	1,01345765
6	500	450	3,242	1,01345765

	SOLAPE 30%	Distancia cordones
1ª Capa		0,81312
2ª Capa	SOLAPE 60%	0,81312
3ª Capa		0,81312

Debido a un error de cálculo, el solape real en la primera capa es del 60% ya que el ángulo de los cordones aplicado en la capa, se ha mantenido a la mitad de lo que realmente debería haber sido.

En cuanto al cable de diámetro  $\varnothing 3$  mm, se ha seguido la misma estrategia, con parámetros de recubrimiento diferentes. Los parámetros base se han obtenido a partir de los dos cordones con mejores características de los ensayos previos realizados.



Tabla 9. Parámetros de recubrimiento del cable de diámetro  $\varnothing 3$  mm.

Parámetros base - Ensayos de recubrimiento de cable de aislamiento mineral - $\varnothing 3$ mm						
P [W]	F [mm/min]	$\dot{m}$ [g/min]	RPM [%]	Altura [mm]	Anchura [mm]	Penetración [mm]
150	450	3,242	1,013457653	0,2141	0,9637	0,0480
200	450	3,242	1,013457653	0,4034	1,0198	0,2075
175	450	3,242	1,013457653	0,3088	0,9918	0,1278

Parámetros del recubrimiento

	P [W]	F [mm/min]	$\dot{m}$ [g/min]	RPM [%]
1	175	450	3,242	1,01345765
2	175	450	3,242	1,01345765
3	275	450	3,242	1,01345765
4	275	450	3,242	1,01345765
5	375	450	3,242	1,01345765
6	375	450	3,242	1,01345765

SOLAPE 30%	Distancia cordones
1ª Capa	0,694225
2ª Capa	0,694225
3ª Capa	0,694225

### 6.9 Obtención de resultados III

Las muestras a analizar se obtienen de manera idéntica a los primeros resultados de integración. La única diferencia es que en este caso los cables que se han cortado, encapsulado, pulido y atacado han sido de  $\varnothing 4,5$  mm y  $\varnothing 3$  mm de diámetro mientras que en el caso anterior fueron cuatro los tamaños de cable seccionados.

### 6.10 Ensayos de integración del termopar

El último ensayo que se va a realizar en este proyecto, es el de integración del termopar. Para ello, se dispone de unos termopares que varían en diámetro, cuyo recubrimiento se realiza con los parámetros obtenidos en los resultados de integración de los cables. El termopar tiene tres zonas distinguidas como se puede ver en la siguiente imagen, la zona de mayor diámetro, la zona de menor diámetro y la zona de transición.

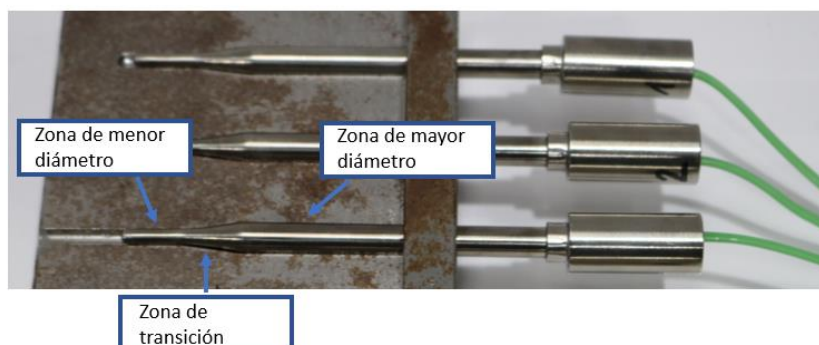


Ilustración 55. Termopar a integrar.

La zona de mayor diámetro, corresponde a un diámetro de  $\varnothing 6$  mm y la zona pequeña a uno de  $\varnothing 3$  mm. Como los cordones a aportar deben ser continuos, es decir, no se puede parar el

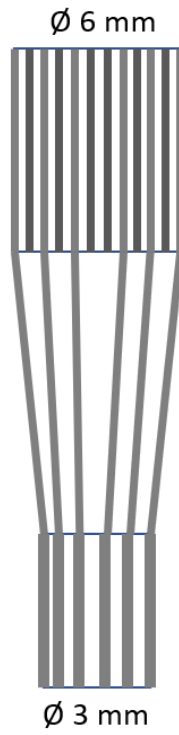
aporte en una zona y comenzar con otros parámetros en otra ya que de esta manera los cordones no presentarían la continuidad metalúrgica necesaria, se seleccionan los parámetros de aporte para un cable de diámetro  $\varnothing 3$  mm para toda la vaina del termopar. Además, se realizarán los aportes con una estrategia diferente y con algunas modificaciones propuestas tras analizar los resultados de los ensayos de integración de los cables de  $\varnothing 3$  mm.

Esta estrategia surge debido a que hasta ahora se han integrado cables de diferente diámetro, pero en cada ensayo el diámetro ha sido constante. En este caso se requiere la integración de un termopar con dos diámetros diferentes y una intermedia de forma cónica que transcurre del mayor al menor diámetro. Por lo tanto, se ha decidido realizar el aporte de la siguiente manera:

- Se comienza a aportar desde un lateral en la zona de mayor diámetro, para una buena fusión entre sustrato, vaina protectora y polvo aportado. Este aporte varía en X a lo largo de la forma tubular y uno de cada dos cordones, continúa por la zona cónica variando en X e Y, hasta llegar a la zona de menor diámetro.
- En la zona cónica, el área de aporte disminuye, debido a que los cordones se han de aportar de manera diagonal, se decide aportar un cordón por cada dos cordones correspondientes a la zona de  $\varnothing 6$  mm, suficiente para unir la zona de transición al sustrato y recubrir toda la zona.
- Finalmente, en la zona de menor diámetro, continuarán hasta el final los cordones que comenzaron al principio, pasando por la zona de transición y llegando al final de la zona de diámetro  $\varnothing 3$  mm.

En cuanto a los parámetros utilizados en el aporte, se ha decidido realizar un aporte de cordones con un 60% de solape en la primera capa y aumentar ligeramente la potencia de aporte a 200 W. Con estas modificaciones, se pretende mejorar la unión entre sustrato y cubierta en el aporte y solventar en la medida de lo posible las faltas de fusión detectadas en los ensayos. Los valores de avance y caudal de polvo se mantienen constantes, en 450 mm/min y 4,5 g/min. Así, el aporte energético aumenta en este ensayo





*Ilustración 56. Estrategia de aporte para la integración del termopar.*

## 7. Resultados

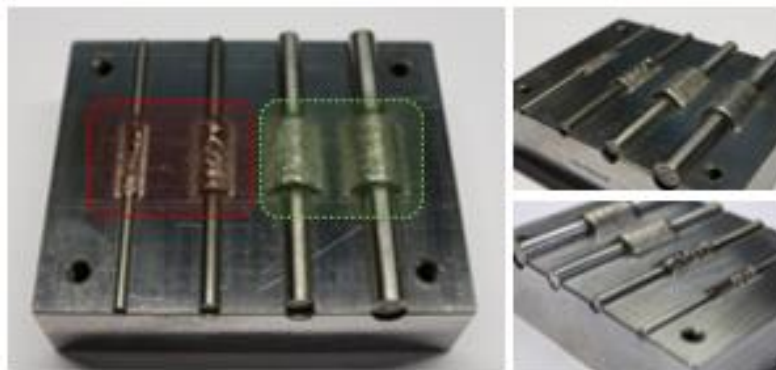
A lo largo de este punto, se mostrarán los resultados obtenidos en las diferentes etapas de ensayos realizados a lo largo del proyecto. A su vez, se analizarán los resultados obtenidos, mencionando las características que presentan las micrografías, discutiendo las virtudes y defectos que presentan y en medida de lo posible cómo evitar la aparición de esos defectos.

### 7.1 Resultados ensayos de integración I

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los primeros ensayos de integración realizados. Por claridad se compondrá de dos apartados separados según la estrategia de aporte utilizada para recubrir los cuatro cables con aislamiento mineral.

#### 7.1.1 Estrategia 1

Partiendo de los ensayos preliminares realizados, se han aplicado los resultados obtenidos al aporte de cables con aislamiento mineral de distintos diámetros, en concreto,  $\varnothing 3$  mm,  $\varnothing 4,5$  mm,  $\varnothing 6$  mm,  $\varnothing 8$  mm; que se han realizado siguiendo la estrategia explicada en el apartado metodología.



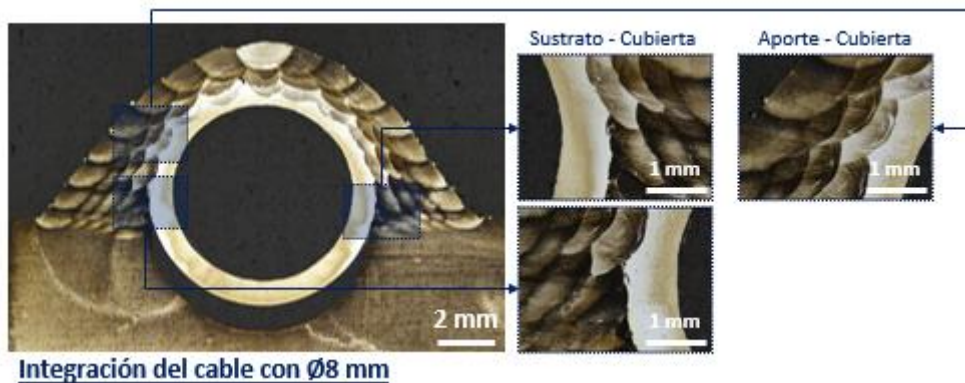
*Ilustración 57. Ensayos realizados en base a la estrategia 1.*

En esta figura se muestran los aportes realizados para la integración de los cables con aislamiento mineral. A priori, parece que los dos de mayor diámetro, es decir los de diámetro  $\varnothing 6$  mm y  $\varnothing 8$  mm, no se han visto deteriorados durante el proceso de aporte. Sin embargo, basándose simplemente en inspección visual, la falta de integridad metalúrgica de los aportes de cables con menor diámetro es evidente. Esto se debe a que, durante el proceso de aporte, se ha perforado la cubierta de AISI 316 dejando el aislamiento mineral de óxido de magnesio expuesto.

A continuación, se recogen los resultados de la inspección metalográfica realizada.

#### **Cable de $\varnothing 8$ mm**

La buena apariencia del aporte sobre el cable de mayor diámetro se ve confirmada en la inspección metalográfica. En la ilustración 58, se muestra una vista completa del aporte realizado, además de los detalles correspondientes a la unión entre sustrato y vaina, y la unión entre el material de aporte y la cubierta. Estas zonas se consideran críticas, donde debe asegurarse una buena transmisión de calor y, por tanto, una buena unión metalúrgica.



*Ilustración 58. Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte.*

En el análisis metalográfico, se observa que se ha logrado una buena unión tanto entre sustrato y cubierta, como entre aporte y cubierta. En los detalles de la anterior ilustración, se puede confirmar la unión metalúrgica entre todos los elementos, asegurando una correcta transmisión térmica de lo que sería el utillaje y el sensor integrado. Además, al medir la continuidad de los conductores se han obtenido resultados positivos para los cuatro conductores que constituyen el cable, confirmando que estos no han sido dañados durante el proceso de aporte. Sin embargo, se ha detectado alguna grieta originada por una falta de fusión en la primera capa aportada, además de observarse que, si bien la cubierta no ha sido perforada por el láser durante el aporte, la profundidad de los cordones de la primera capa podría reducirse para mayor seguridad.



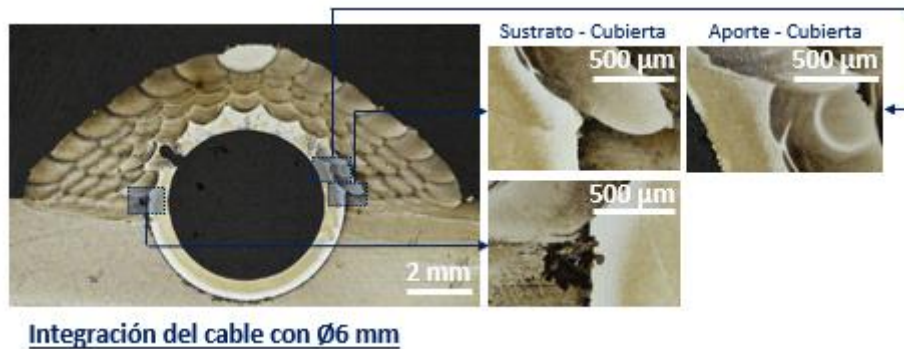
*Ilustración 59. Grieta en la zona superior del cable de diámetro Ø8.*

En definitiva, se concluye que la integración de cables de aislamiento mineral de diámetro Ø8 mm mediante LMD es viable y que, la estrategia empleada, con ligeros ajustes, es adecuada para el aporte de los mismos.

### **Cable de Ø6 mm**

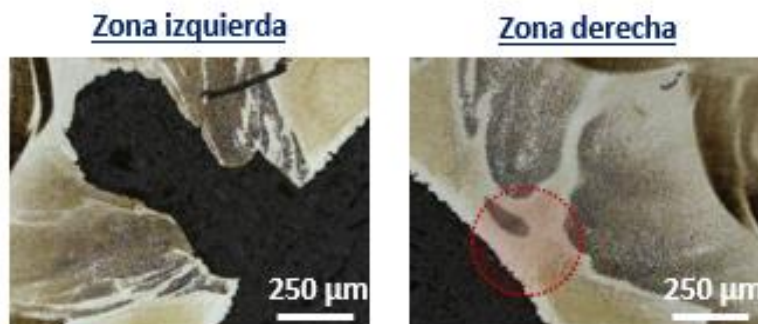
Si bien aparentemente el aporte realizado sobre el cable de diámetro Ø6 mm podría ser válido, al realizar el análisis metalográfico se observa que, durante el proceso de aporte, el láser ha perforado la cubierta de AISI 316 (Ilustración 60) en la zona izquierda del cable. Sin embargo, si nos centramos en las zonas de unión, se podría decir que las uniones obtenidas son

íntegras y de buena calidad, ya que se ha logrado una fusión metalúrgica entre los componentes. Además, cabe destacar que, pese a que la cubierta ha sido perforada, los cuatro conductores han mantenido su continuidad durante el proceso, sin haber sido deteriorados por el mismo.



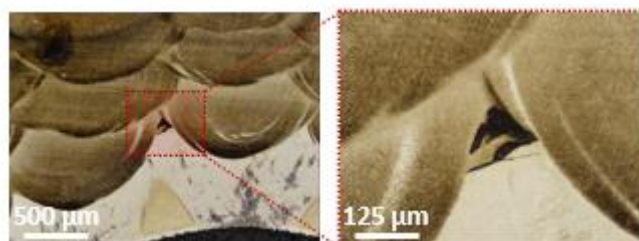
*Ilustración 60. Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte*

Reparando en la zona de la cubierta que ha sido perforada, se concluye que esto se debe a la penetración del láser en el sustrato, causado por un aporte energético excesivo para la capacidad de disipación de calor de la superficie. Además, si bien es el lado izquierdo de la cubierta el que ha sido perforado, se observa que el cordón simétrico, del lado derecho, tiene una gran penetración y es una zona crítica en la que podría haber una perforación de la vaina. De forma que, si bien este lado de la cubierta no ha sido dañado, hay un gran riesgo de que lo sea.



*Ilustración 61. Zonas críticas de gran penetración en la cubierta.*

Además, al igual que en el caso del cable de diámetro Ø 8 mm, se observan faltas de fusión entre cordones, debido a un solape insuficiente.



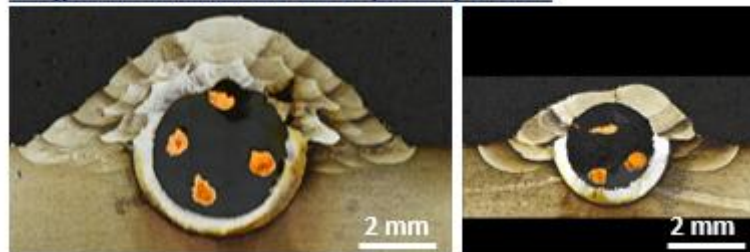
*Ilustración 62. Faltas de fusión debidas a un solape insuficiente.*

En este caso también se concluye con que la estrategia y parametrización del aporte son adecuadas y, que reduciendo el aporte energético en las primeras capas y reajustando el solape entre cordones, se podría obtener un cable integrado con un recubrimiento con una buena unión metalúrgica.

### **Cables de Ø4,5 mm y Ø3 mm**

Para el caso de la integración de cables con menor diámetro, no se han obtenido buenos resultados, ya que, en ambos casos, el aporte energético es excesivo y la cubierta se perfora con el aporte de los primeros cordones. Más concretamente, en el caso del cable de diámetro Ø4,5 mm la cubierta se ha perforado durante el aporte del tercer cordón y, en el caso del cable de diámetro Ø3 mm, durante el aporte del segundo cordón. En definitiva, el aporte de la primera capa en ambos casos ha sido realizado sobre el óxido de magnesio que queda al descubierto tras fundir la cubierta de AISI 316. En lo que se refiere a la continuidad de los conductores, no se ha conservado la misma en ninguno de los dos casos, al menos, no en los cuatro conductores. De esta forma, se puede concluir que los conductores han sido deteriorados durante el proceso de aporte, quedando el cable de aislamiento mineral inservible para funciones de sensorización.

**Integración de los cables con Ø4,5 mm y Ø3 mm**



*Ilustración 63. Vista general de los aportes realizados sobre los cables de diámetro Ø4,5 mm y Ø3 mm.*

En conclusión, con el fin de obtener aportes íntegros sobre los cables de menor diámetro es necesario obtener nuevos parámetros de aporte, teniendo en consideración además la geometría de la cubierta del cable que, debido a su pequeño espesor, tiene grandes dificultades para evacuar el calor del proceso.

Tras analizar los resultados obtenidos durante los ensayos realizados, se ha concluido que uno de los principales problemas de la estrategia de aporte empleada es el excesivo aporte energético durante, al menos, las primeras capas y la consecuente perforación de la cubierta del cable de aislamiento mineral. Si bien la penetración de los cordones en los ensayos preliminares era del orden de 0,2 mm y, por tanto, menor que el espesor de la cubierta, al realizar los aportes sobre sustratos tan finos y con tan poca capacidad de evacuación de calor, la penetración se ve acentuada, llegando a perforar la cubierta de los cables.

#### **7.1.2 Ensayos de integración de cables con aislamiento mineral: Estrategia 2**

Tal y como se ha mencionado en el apartado de la metodología, se han repetido los ensayos realizados con la estrategia 1, reduciendo la potencia del láser a 500 W durante el aporte de las dos primeras capas. Además, se ha introducido también un tiempo de espera entre

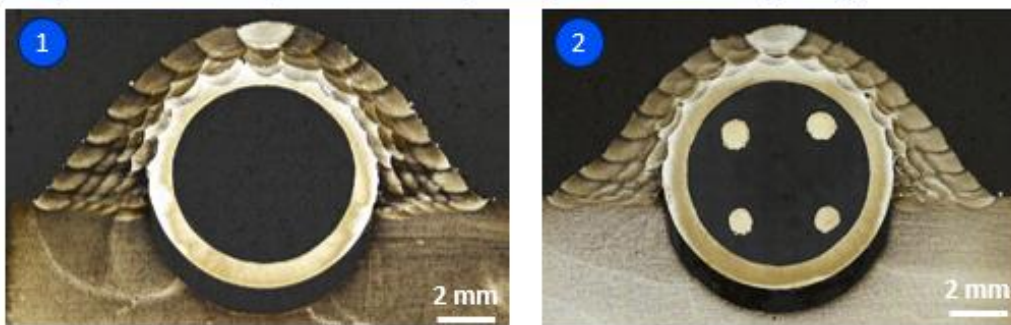


cordones de 30 s en todas las capas con el objetivo de potenciar la disipación del calor y reducir el sobrecalentamiento del sustrato y los cordones ya aportados.

### **Cable de Ø8 mm**

Tras reducir el aporte energético en las primeras capas aportadas, se observa que la penetración del aporte disminuye convenientemente, en comparación con la primera estrategia planteada (Ilustración 64). Sin embargo, en las zonas de unión entre cubierta y sustrato (Ilustración 65), la penetración del aporte no es suficiente y no se consigue una unión metalúrgica necesaria para asegurar una correcta transmisión del calor.

#### **Comparación de la integración del cable Ø8 empleando las estrategias 1 y 2**



*Ilustración 64. Cables de diámetro Ø8 mm aportados con las estrategias 1 y 2.*

Esta falta de unión entre aporte y cubierta sólo se da en las zonas inferiores, debido a que, en esas áreas, el ángulo de incidencia del láser no es perpendicular a la superficie y, por tanto, el aporte energético es insuficiente como para asegurar la unión.

#### **Penetración insuficiente en las zonas inferior derecha e izquierda del aporte**



*Ilustración 65. Zonas críticas de penetración insuficiente.*

Además, se han detectado también numerosas faltas de fusión entre cordones debido a un solape insuficiente. Por tanto, al reducir el aporte energético del proceso habría que reajustar los valores de solape y realizar una nueva caracterización geométrica de los cordones.

A pesar de los defectos encontrados, esta estrategia resulta menos agresiva con el sustrato y, por tanto, es más adecuada. Si bien es cierto, que hay que realizar una serie de modificaciones que se comentarán más en detalle al final de este apartado.

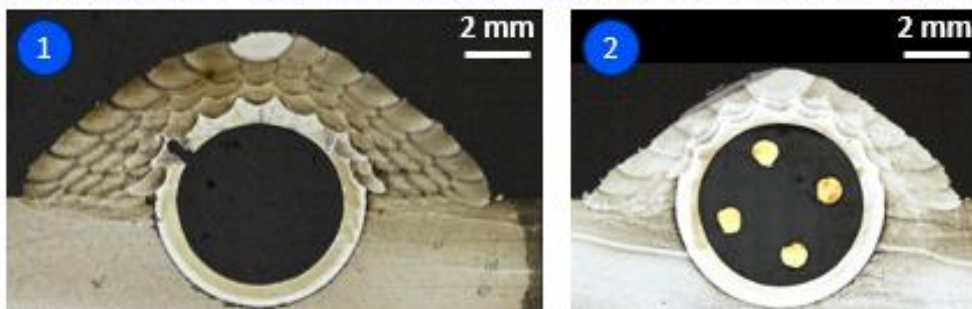
### **Cable de Ø6 mm**

Con la estrategia 1 y el cable de diámetro Ø6 mm, se observó que un aporte energético excesivo resulta en la perforación de la cubierta del cable. Al reducir la potencia del láser en las dos primeras capas, se ha disminuido la penetración del aporte de forma que evita dañar

el cable, tal y como se ve en la ilustración comparativa (Ilustración 66). Sin embargo, al igual que en el caso del cable de mayor diámetro, se ha detectado una unión insuficiente en la zona inferior del aporte, es decir, en la unión entre sustrato y cubierta. En cualquier caso, la mejora al trabajar con un aporte energético más controlado durante el aporte de las primeras capas es evidente.

Por último, hay que destacar que al igual que en el caso anterior, hay ciertas faltas de fusión debidas a un solape inadecuado que es necesario corregir mediante un reajuste del mismo.

### Comparación de la integración del cable Ø6,5 empleando las estrategias 1 y 2



*Ilustración 66. Cables de diámetro Ø6 mm aportados con las estrategias 1 y 2.*

### Cables de Ø4,5 mm y Ø3 mm

Si bien la reducción de la potencia ha resultado ser efectiva para los casos de los cables de mayor diámetro, es una medida insuficiente en el caso de los de menor diámetro. Aun reduciendo la potencia, la cubierta del cable ha sido perforada en ambos casos. Por tanto, se ha concluido que es necesario un cambio completo de estrategia, ya que es imprescindible reducir la penetración de los aportes en el cable.

Una de las soluciones posibles consiste en realizar un escalado de la geometría de los cordones, lo cual no es realizable en las instalaciones disponibles.

En definitiva, se concluye que la estrategia 2 resulta en un aporte de material menos agresivo para la cubierta del cable de aislamiento mineral y, por tanto, es más adecuada para la integración de sensores en utillajes. Sin embargo, hay ciertas dificultades a las que hay que hacer frente como pueden ser la unión entre cubierta y sustrato debidos a una insuficiente penetración del aporte en la zona inferior, y las numerosas faltas de fusión detectadas entre cordones, debidas a un solape inadecuado que es necesario recalcular.

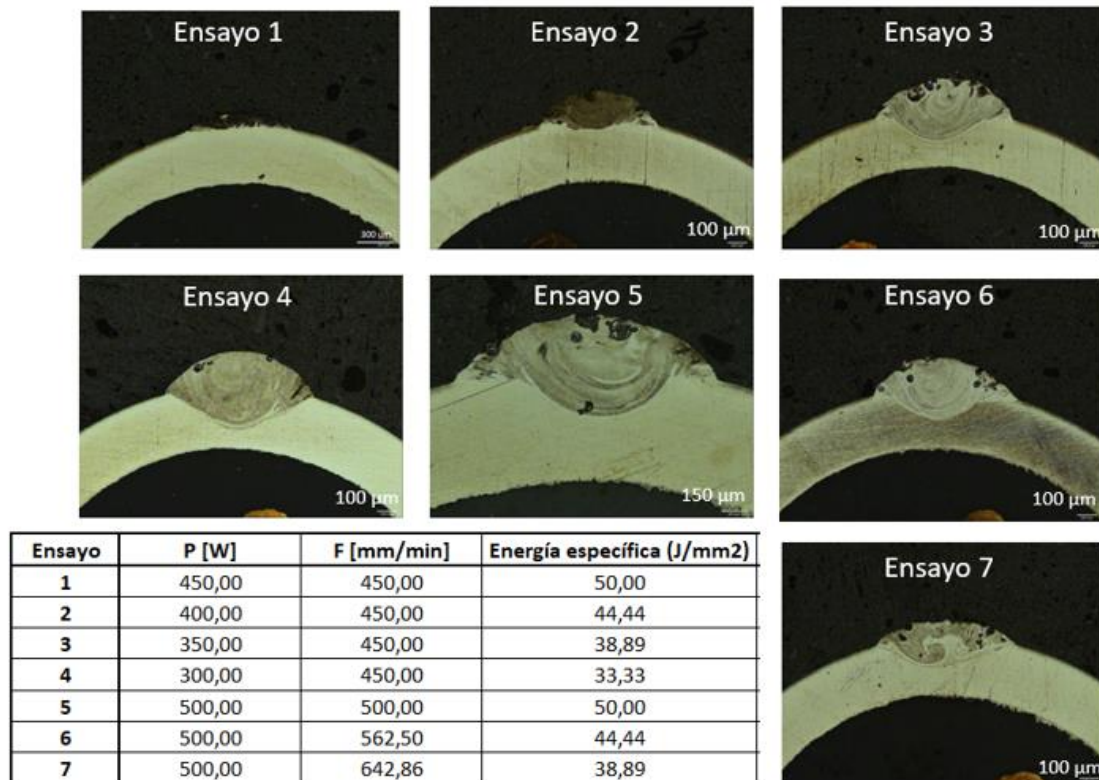
## **7.2 Resultados ensayos de parametrización y caracterización del material**

Con la ventana de parámetros a priori válidos obtenida, los resultados a primera vista parecen ser razonables. Los cables presentan un recubrimiento más o menos uniforme dependiendo de los parámetros del aporte, sin aparentes signos de penetración o deterioro de la capa aportada.

### Cable de Ø4,5 mm

En los cables de 4,5 mm de diámetro, los ensayos presentan una mejor apariencia debido al mayor espesor del aislante del cable, ya que es capaz de disipar mejor el calor al ser un sustrato más ancho. Tras realizar los aportes en los 7 cables, todos presentan un buen aspecto con una simple inspección visual.

Una vez preparadas las muestras para obtener imágenes de su microestructura, se puede observar que ninguno de los aportes penetra la capa aislante. En la imagen mostrada a continuación se pueden observar los diferentes aportes sobre el cable.

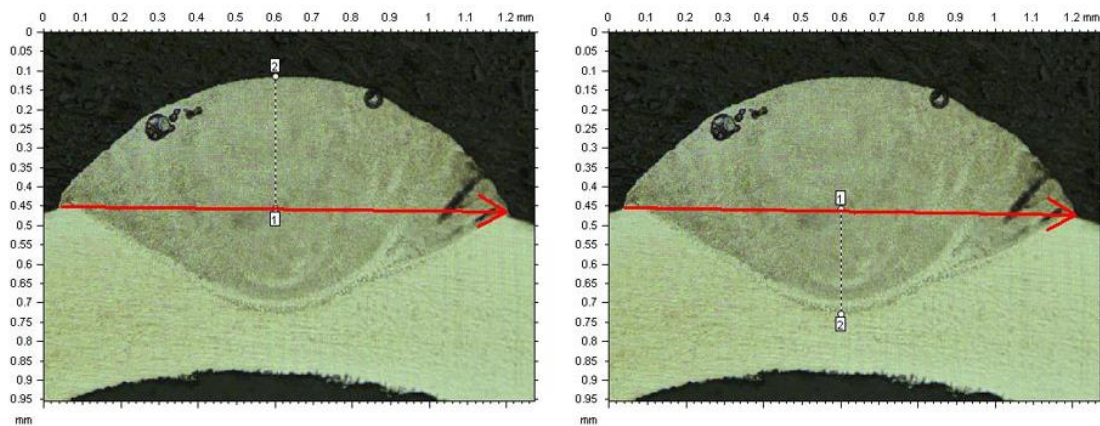


*Ilustración 67. Análisis de los aportes en cables de diámetro Ø4,5 mm.*

Los cordones aportados sobre el sustrato presentan diferentes aspectos y características evidentemente. Aunque ninguno de ellos penetra en el conductor, los cordones 3 y 4 son los que mejores resultados presentan teniendo en cuenta el objetivo que se persigue.

Teniendo en cuenta que este es el aporte de la primera capa, se busca un cordón que sea uniforme y que cumpla con unas características de altura, anchura y dilución. La altura debe ser menor de la mitad que la anchura para que el cordón presente un ángulo de mojado menor de 45° y sea adecuado para el aporte de las siguientes capas. Además, la dilución debe ser como mínimo menor que el espesor de la cubierta protectora, siendo más adecuada una penetración menor a la altura del cordón. Los cordones 3 y 4 son los que más se acercan a las características buscadas ya que son los más uniformes, presentan una dilución notable pero una altura y anchura de cordón razonables, siendo de entre los dos el cordón número 4 el seleccionado como mejor opción.

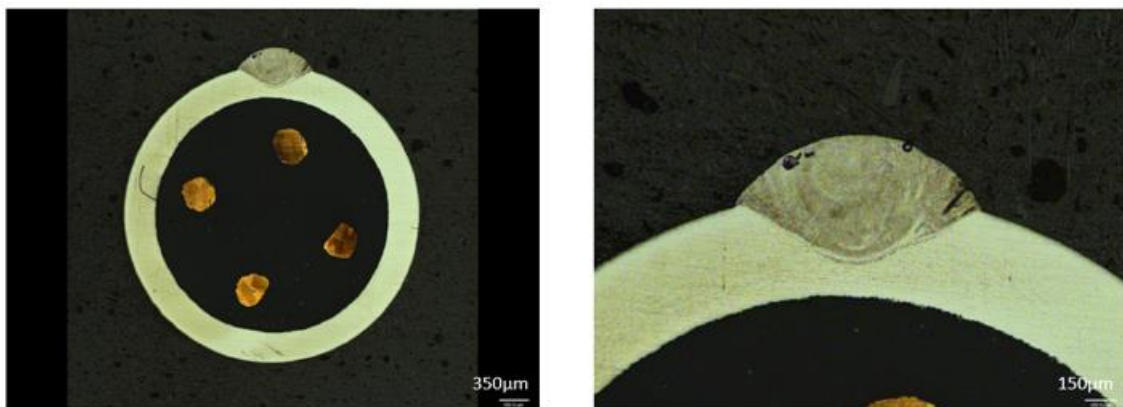




*Ilustración 68. Mediciones del cordón número 4*

Una vez obtenidas las imágenes de las microestructuras de las diferentes muestras, se miden en ellas la altura, anchura y dilución de cada cordón en su sustrato. El cordón seleccionado dispone de una altura de 0,3436 mm, una anchura de 1,1616 mm y una profundidad de penetración de 0,2739 mm.

Estos factores son importantes de cara al aporte de las siguientes capas. Haciendo especial hincapié en el cordón número 4, si bien la dilución se acerca considerablemente a la altura del cordón, hay que tener en cuenta que al aportar las siguientes capas esta dilución disminuirá, por tanto, puede ser un valor válido. Por otro lado, los parámetros escogidos para este ensayo son los que menor número de partículas de AISI H13 sin fundir presentan, cumpliendo con una forma uniforme a lo largo de todo el cordón.



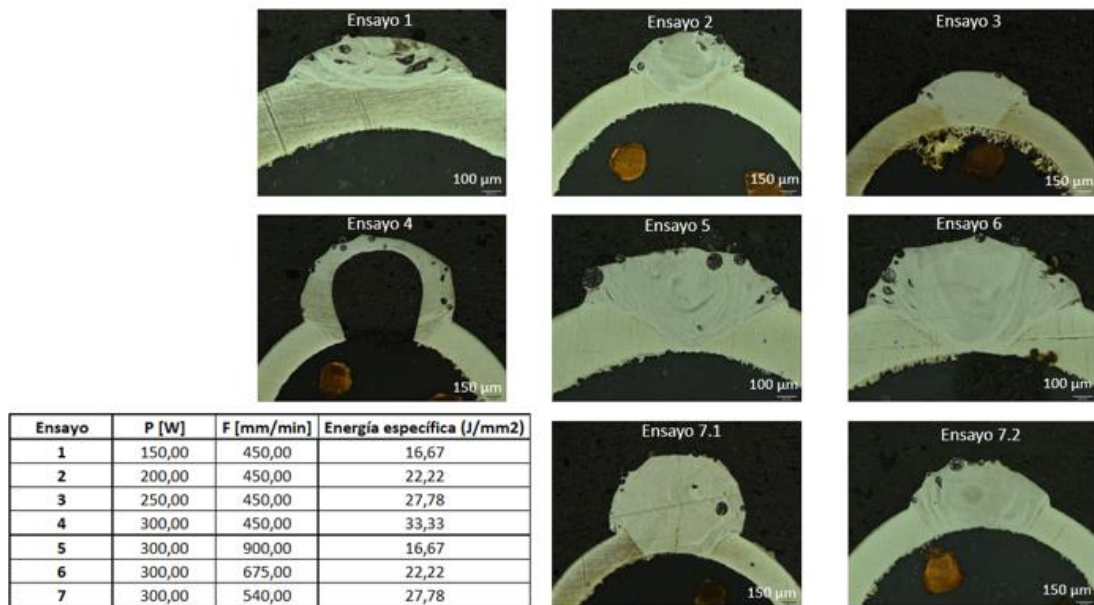
*Ilustración 69: Microestructura del cordón número 4.*

El resto de cordones, ya sea por una potencia excesivamente baja como por una velocidad de avance muy rápida, no cumplen con los requisitos buscados para el recubrimiento de los cables con aislamiento mineral.

### Cable de Ø3 mm

En cuanto a los resultados de los ensayos en cables de 3 mm de diámetro, estos presentan una mayor cantidad de defectos con una simple inspección visual. Las estructuras a lo largo del cordón son más irregulares y solamente los ensayos 1 y 2 presentan geometrías sin penetración, sin quemaduras y aparentemente uniformes.

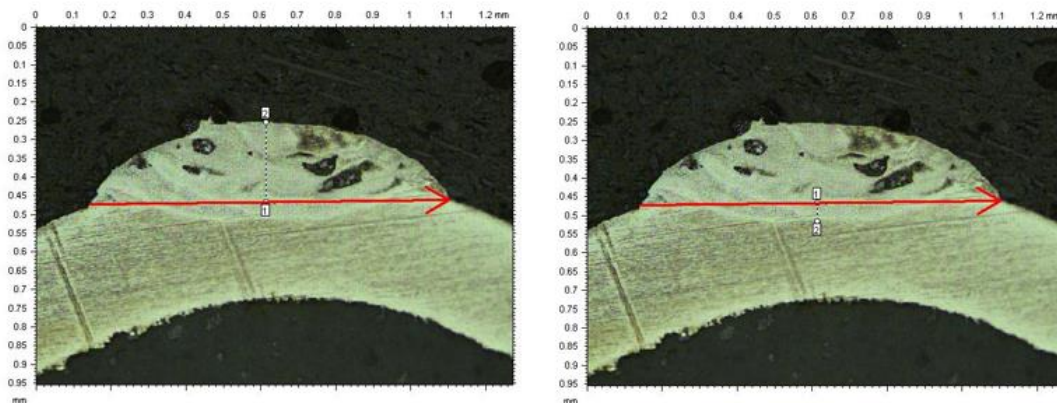
Se han realizado 7 ensayos, dividiendo el ensayo número 7 en dos secciones, debido a las notables irregularidades que muestra a lo largo del cordón.



*Ilustración 70: Análisis de los aportes en cables de diámetro Ø3 mm.*

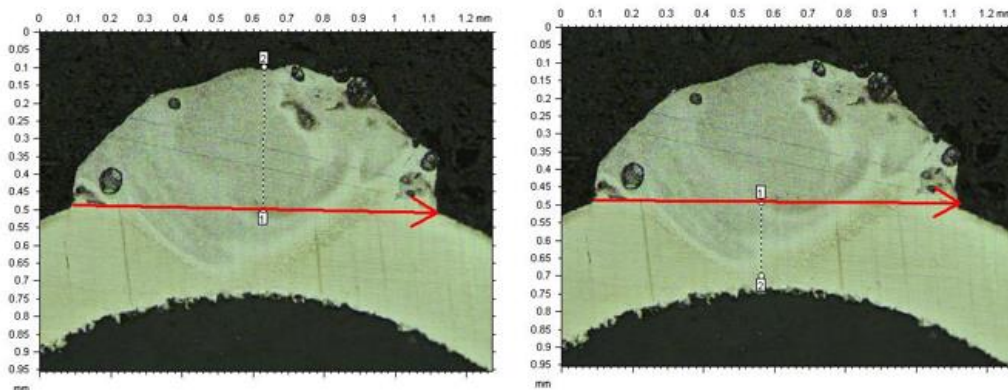
Como se puede observar en la ilustración anterior, solamente los parámetros de los primeros dos ensayos consiguen aportar un cordón que no penetre la capa protectora del cable. El ensayo 5 está en el límite del espesor de la vaina del cable, pero la estructura del cordón es muy irregular y se considera inaceptable para el posterior aporte de capas con estos parámetros.

Por tanto, los ensayos 1 y 2 son los que presentan una microestructura adecuada para continuar aportando. Dentro de estos dos ensayos, es evidente la diferencia de parámetros entre ambos.



*Ilustración 71: Mediciones del cordón número 1*

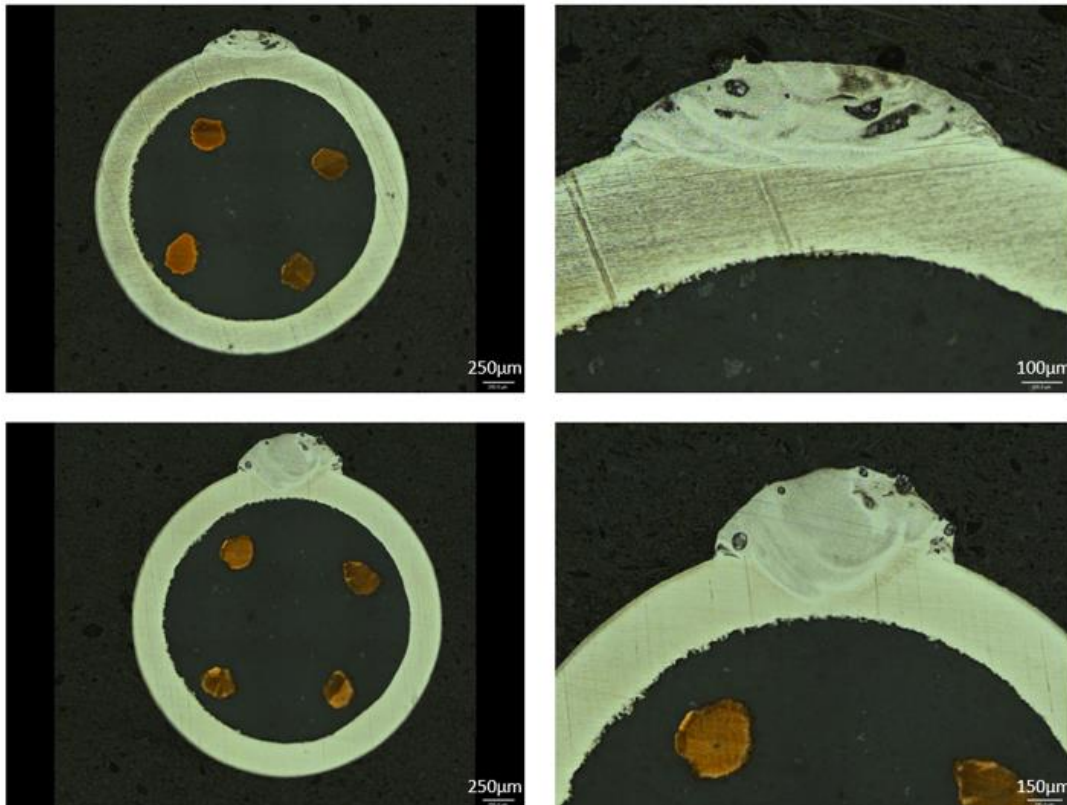
De igual manera que para el cable de 4,5 mm de diámetro, se han medido los parámetros característicos de los cordones de los ensayos 1 y 2. En este caso, el cordón número 1 mide 0,2141 mm de alto, 0,9637 mm de ancho y penetra en el sustrato 0,048 mm.



*Ilustración 72: Mediciones del cordón número 2*

El cordón número 2 tiene unas características muy diferentes, midiendo 0,4034 mm de alto, 1,0198 mm de ancho y penetrando en el sustrato 0,2075 mm.

El ensayo número 1 presenta una dilución mucho menor que el ensayo número 2, siendo esto un posible problema para el aporte de las siguientes capas ya que la dilución será menor en las siguientes. Por otro lado, la geometría del cordón es más regular y el hecho de que la altura sea menor puede favorecer al solape con cordones colindantes.



*Ilustración 73: Microestructura de los cordones número 1 y 2.*

En el análisis metalográfico se observa que se ha logrado una buena unión entre sustrato y cubierta. Sin embargo, la energía específica sigue siendo excesiva para aportar en un sustrato tan fino, siendo estas las únicas opciones válidas, con la energía aportada más baja de todos los ensayos realizados.

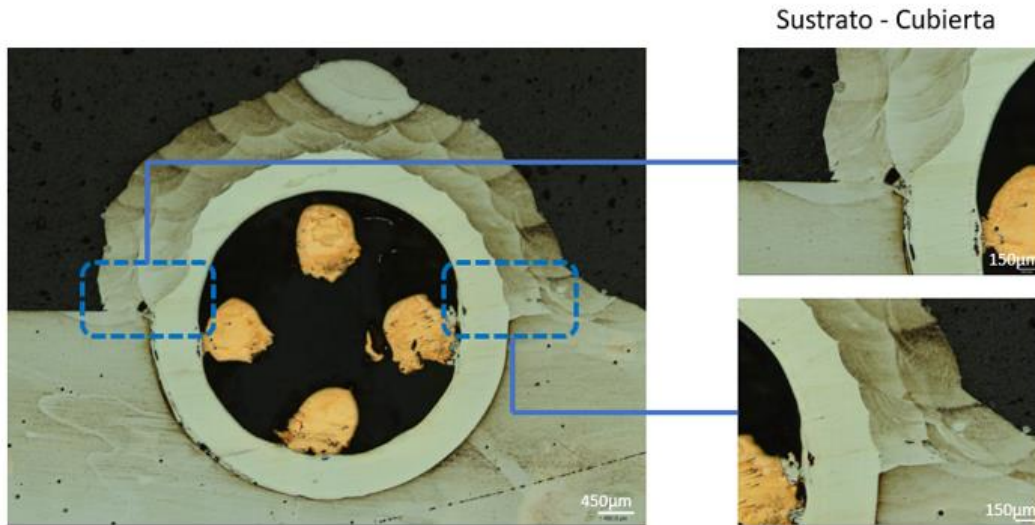
### **7.3 Resultados ensayos de integración II**

Una vez habiendo realizado los aportes de los cordones sobre los cables de manera que se haya integrado el cable con el sustrato se obtiene una capa que cubre totalmente la vaina protectora del cable con el sustrato. A continuación, se muestran las imágenes de los resultados en los dos tamaños de cables.

#### **Cable de Ø4.5 mm**

Teniendo en cuenta el error cometido en la primera capa, la integración del cable de Ø4,5 mm de diámetro muestra una buena unión tanto entre sustrato y cubierta, aunque no tanto entre aporte y cubierta.

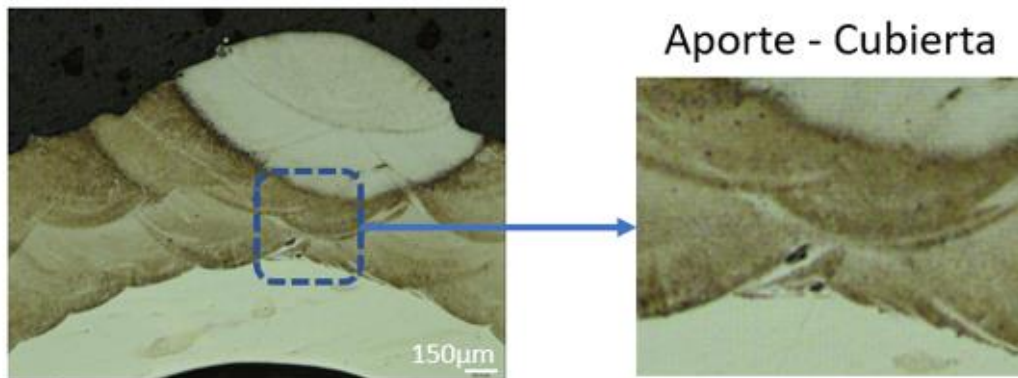




*Ilustración 74. Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte.*

En los detalles mostrados en la imagen anterior, se puede observar cómo hay una falta de material en uno de los extremos de la unión entre cubierta y sustrato, mientras que en el otro la unión se ha realizado de manera más uniforme. Aun así, la falta de fusión es notable en ambos lados, por lo que haría falta un mayor aporte de energía en la unión sustrato-cubierta para realizar la unión correctamente. Por otro lado, la falta de simetría en el aporte se debe a dos razones principalmente. La primera, un mal alineamiento de la pieza, que, al estar desencajada en el sustrato, produce una ligera desviación que hace que el aporte se vea afectado. La segunda, el uso de una boquilla discreta de tres inyectoros de polvo. Realizar el proceso con esta boquilla puede producir una distribución de polvo asimétrica, ya que su flujo depende de la direccionalidad.

En el análisis metalográfico, también se puede destacar la uniformidad de los cordones a lo largo del perímetro en su unión con el AISI 316. Esta unión no presenta grietas ni porosidades y la penetración del material aportado es suficiente para adherirse a la capa protectora de manera eficiente. Además, el solape del 60% de la primera capa no parece que sea perjudicial para el proceso, disminuyendo la dilución del cordón, creando una primera capa equilibrada y proporcionando una buena base para la siguiente capa aportada. Este alto porcentaje de solape puede favorecer el aporte de la primera capa de material sobre la cubierta, disminuyéndolo en capas posteriores. El único defecto a resaltar es la aparición de material en polvo sin fundir en el último cordón aportado de la primera capa, en el centro del cable, como se muestra en la siguiente imagen. Finalmente, se puede observar por el último cordón aportado, cómo el aporte es asimétrico, ya que en condiciones óptimas ese cordón debería haber estado totalmente centrado.

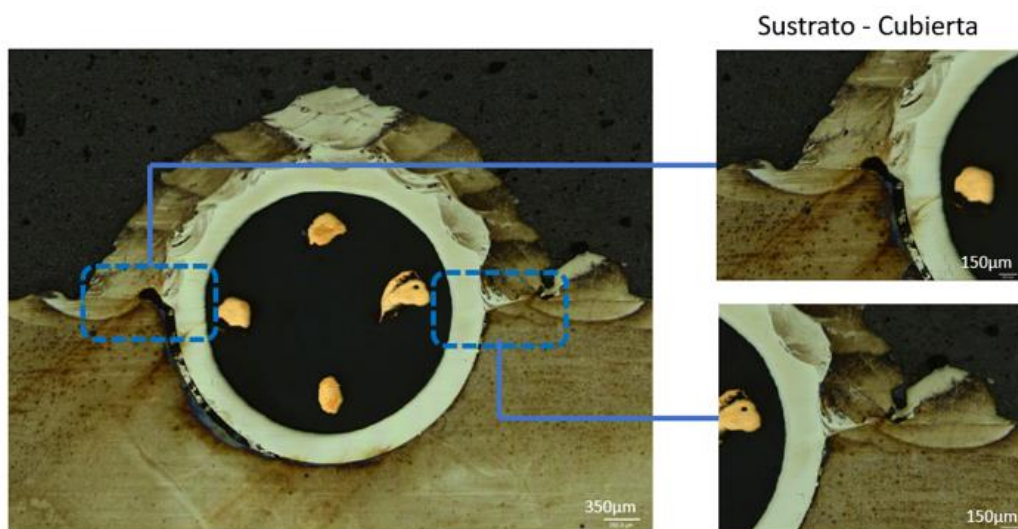


*Ilustración 75. Análisis de la unión entre aporte y cubierta.*

A pesar de los defectos detectados, la integración en el cable de  $\varnothing 4,5$  mm de diámetro presenta una buena unión entre aporte y cubierta, y también entre cubierta y sustrato. Con unos ligeros ajustes en la parametrización o en la estrategia de aporte, se pueden solucionar esos problemas. Lo importante es que no se penetra la capa protectora del cable en ningún momento y la microestructura no presenta defectos importantes.

### **Cable de $\varnothing 3$ mm**

En este caso, se ha mantenido un solape del 30% en las tres capas aportadas. En un análisis macroscópico, la capa que une el cable con el sustrato muestra un buen aspecto, proporcionando continuidad a lo largo del aporte.



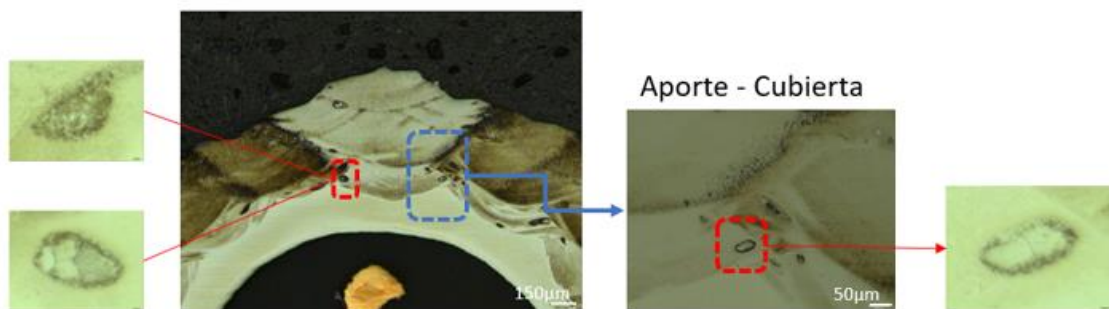
*Ilustración 76: Análisis de la unión de la cubierta al sustrato y al aporte.*

Frente a una situación parecida a la integración del cable de diámetro  $\varnothing 4,5$  mm, en este se observa, además, una mayor cantidad de defectos. Como en el caso anterior, la falta de fusión en los extremos es notable, produciendo el mismo fallo de unión entre sustrato y cubierta. Además, como se ve en la imagen, en este caso el alineamiento de la pieza con el sustrato es peor, produciendo una mayor falta de material en la unión sustrato – cubierta en el extremo izquierdo. Esto se debe a que el hueco del sustrato y el cable a integrar no son del mismo tamaño, hay una ligera desviación y por tanto el hueco es mayor. Al optar por parámetros de

potencia menores para este caso, se ve cómo apenas hay adhesión en ninguno de los extremos entre sustrato y cubierta.

También hay que destacar, que como se trabaja por debajo del límite mínimo de estabilidad del láser, es decir, un 10% de la potencia máxima del mismo, esto sería 300 W y por tanto hay un mayor riesgo de fluctuación de la potencia, provocando un aporte más irregular. Como se ve en la macrografía, el aporte ha sido asimétrico pero la superficie a lo largo de las capas aportadas es muy irregular. A pesar de que el polvo aportado se une de forma correcta con la vaina protectora, la penetración varía a lo largo de la primera capa, siendo muy baja en ciertas zonas.

Como se ha mencionado anteriormente, la unión entre el aporte y la cubierta es buena, aunque presenta defectos. Estos puntos negros mostrados en la imagen a continuación se refieren a material en polvo sin fundir. Ya se localizaron en los ensayos de los monocordones, aunque en principio se deberían solucionar al aportar la siguiente capa y fundirse con la anterior. La velocidad del proceso de aporte puede ser un inconveniente en este caso, ya que, al aportar material a elevadas velocidades y potencia insuficiente, el láser no es capaz de asegurar una fusión completa del polvo aportado.



*Ilustración 77: Análisis de la unión entre aporte y cubierta.*

En definitiva, la estrategia de aporte es correcta, aunque es necesario realizar unos ajustes tanto en la estrategia como en la parametrización. Por un lado, se debe aumentar la potencia para evitar acumulaciones o partículas de polvo sin fundir. Además, se puede aumentar el solape como en el caso del cable de  $\varnothing 4,5$  mm de diámetro, viendo que ese aumento de solape en la primera capa proporciona una buena unión entre aporte y cubierta y esta presenta una buena integridad metalúrgica, sin faltas de fusión. Por otro lado, es necesario aumentar la potencia del láser al aportar los cordones en los extremos, para asegurar una buena unión entre cubierta y sustrato, eliminando la falta de fusión en esas zonas.

#### **7.4 Resultados ensayos de integración del termopar**

Este último apartado de resultados, a diferencia de los anteriores, no tiene como objetivo visualizar y analizar la microestructura de la superficie de una de las secciones extraídas del ensayo realizado. Es por eso que no se ha realizado el proceso de preparación de probetas como en los demás casos.



Teniendo en cuenta que para la integración del termopar se han seleccionado los parámetros de la integración del cable de diámetro  $\varnothing 3$  mm para toda la geometría del termopar, además del solape del 60% en la primera capa, se da por hecho que esta energía aportada no penetrará la vaina protectora de  $\varnothing 6$  mm ni la zona de transición entre los dos diámetros.



*Ilustración 78. Termopar integrado en el sustrato.*

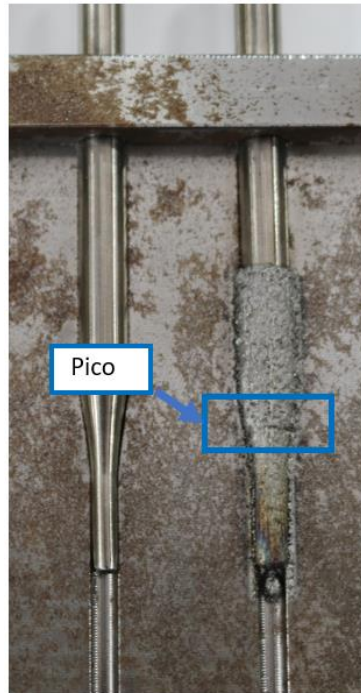
Como se puede ver en la imagen, se ha logrado realizar la integración del termopar en el sustrato de manera que este quede fijo. Por lo tanto, la integración de un termopar con cubierta AISI 316, con aporte de polvo AISI H13 sobre un sustrato de acero AISI H11 es realizable con los parámetros y estrategia empleados en el aporte.

Aun así, con una inspección visual se pueden destacar algunos defectos. En primer lugar, se ve claramente cómo el final del aporte, correspondiente al final de la zona de menor diámetro, sufre quemaduras en su superficie. Esto es debido a que el extremo del termopar esté curvado y esta curvatura se produce por la deformación térmica sufrida tras la incidencia del láser. Al haberse curvado, la distancia real es diferente a la teórica ya que esa elevación lo hace acercarse más al láser, aportando este una cantidad de energía mayor.



*Ilustración 79. Defectos en la integración del termopar I.*

También se nota una zona diferenciada entre los cordones que transcurren de principio a fin y los cordones que solamente son aportados en la zona de mayor diámetro. Esto hace que al comienzo de la zona de transición se note un pico que, a medida que el número de capas aportadas sea mayor, la zona del pico también aumentará en dimensiones.



*Ilustración 80. Defectos en la integración del termopar II.*

Por otro lado, se ve cómo el termopar está integrado en el sustrato y no se ha perjudicado su funcionamiento, ya que se han realizado mediciones de temperatura mientras se aportaban los cordones. Esto quiere decir que la estrategia empleada es válida, aunque claramente mejorable. En primer lugar, se debe aumentar la potencia en los cordones aportados en los laterales del termopar, para garantizar una unión firme y sólida con el sustrato. De esta manera, se pretende evitar que el extremo del termopar se suelte por la deformación térmica sufrida, evitando así que este se curve como ha pasado en este caso y se queme después. En segundo lugar, hay que replantear la estrategia utilizada para aportar los cordones y ver si mediante otro método se pueden aportar cordones de forma continua sin formar ese pico que destaca en el límite de la zona de mayor diámetro y comienzo de la zona de transición.

Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio son buenos, indican la posibilidad de integración de termopares con las estrategias utilizadas y los materiales empleados, pero no son definitivos. Esta integración se puede mejorar si se sigue analizando cada uno de los ensayos, obteniendo secciones y analizándolas posteriormente para ver cómo es la microestructura con mayor detalle, como se ha hecho a lo largo de este proyecto con todas las etapas de ensayos realizados.

## **8. Descripción de tareas. Diagrama Gantt**

### **8.1 Descripción de tareas**

El proyecto de fin de máster se ha dividido en diferentes tareas a la hora de llevar a cabo la investigación. Estas tareas se han organizado de manera progresiva para la correcta evolución del proyecto a lo largo del curso. En el diagrama Gantt se pueden ver los pasos seguidos y el tiempo transcurrido entre tareas desde el principio hasta el final del trabajo de fin de máster.

#### **8.1.1 Documentación previa a la investigación**

El primer paso a realizar antes de empezar a entrar en materia respecto al proyecto principal es el estudio de todos los aspectos que forman el proyecto, desde las características de los materiales empleados hasta las formas de uso de la tecnología a emplear. Por eso, primero hay que investigar sobre los aportes en sustrato fino del material empleado AISI H13, documentarse sobre los tipos de termopares que se van a emplear en la integración mediante LMD y las diferentes estrategias, ventajas y complicaciones que pueden suceder al utilizar diferentes estrategias de aporte. La investigación de los apartados mencionados se realiza principalmente mediante artículos de investigación y libros de texto referentes al tema tratado.

#### **8.1.2 Planificación del proyecto**

Como segundo paso, se procede a planificar la ejecución del proyecto, teniendo en cuenta la selección y aprovisionamiento de los materiales que se utilizarán durante los ensayos, sustratos y material a aportar. Después, se toman las decisiones necesarias sobre cómo proceder con los primeros ensayos y el posterior proceso de evaluación.

#### **8.1.3 Preparación de los ensayos de integración I**

El primer paso antes de realizar los ensayos está compuesto por la puesta a punto del equipo y la materia prima a utilizar, en este caso, la configuración del "setup" del centro láser junto a la preparación de las tolvas del alimentador de polvo y la preparación del sustrato para poder aportar sobre él.

#### **8.1.4 Ensayos experimentales I**

En este apartado se realizan los primeros ensayos experimentales necesarios para obtener los primeros resultados de integración de los diferentes cables. Una vez realizados los ensayos se procede a preparar las muestras y analizar su microestructura posteriormente para valorar los resultados obtenidos.

Se recopila toda la información obtenida y se detectan los defectos en las muestras, identificando sus posibles causas y finalmente se piensa en cómo se puede optimizar el proceso para que no se repitan esos defectos.

### **8.1.5 Replantear la planificación del proyecto**

Tras ver que los primeros resultados obtenidos no son aceptables en gran parte de los ensayos realizados, se toman medidas para mejorar la integración de los cables de mayor diámetro de manera que su integridad metalúrgica no se vea perjudicada.

### **8.1.6 Preparación de los ensayos de parametrización**

Una vez centrados en los dos cables de menor diámetro, se decide realizar unos ensayos de parametrización y caracterización de monocordones donde al igual que en los ensayos de integración, se preparan el centro de aporte láser y los sustratos donde se van a aportar estos cordones, en este caso cables.

### **8.1.7 Ensayos experimentales II**

Esta vez se realizan cordones de material aportado sobre los cables, con el objetivo de analizar qué parámetros son válidos para no perforar la vaina protectora del cable. Posteriormente se obtienen las muestras y se analizan, obteniendo una ventana de parámetros válida para la integración de los cables sin que estos se vean perjudicados en exceso por el aporte de energía.

### **8.1.8 Preparación de los ensayos de integración II**

Como en los ensayos de integración anteriores, se procede a preparar el centro de procesamiento láser y los sustratos sobre los que se van a situar los cables a integrar.

### **8.1.9 Ensayos experimentales III**

Se realiza el recubrimiento de los cables sobre el sustrato con los parámetros obtenidos en los ensayos de los monocordones. Se preparan las muestras y se analiza su microestructura para detectar los defectos en el ensayo y pensar en una mejora del proceso.

Tras concluir con los ensayos de integración, se decide realizar otro ensayo más, esta vez sobre los cables de 3 y 6 mm de diámetro, con otra configuración para obtener una mayor cantidad de datos y resultados sobre el proceso y concluir con una mayor base de información sobre los resultados obtenidos.

### **8.1.10 Preparación de los ensayos de los termopares**

Una vez obtenidos unos parámetros válidos en el apartado de integración de los cables, se procede a preparar los sustratos y la máquina láser para la integración de los termopares.

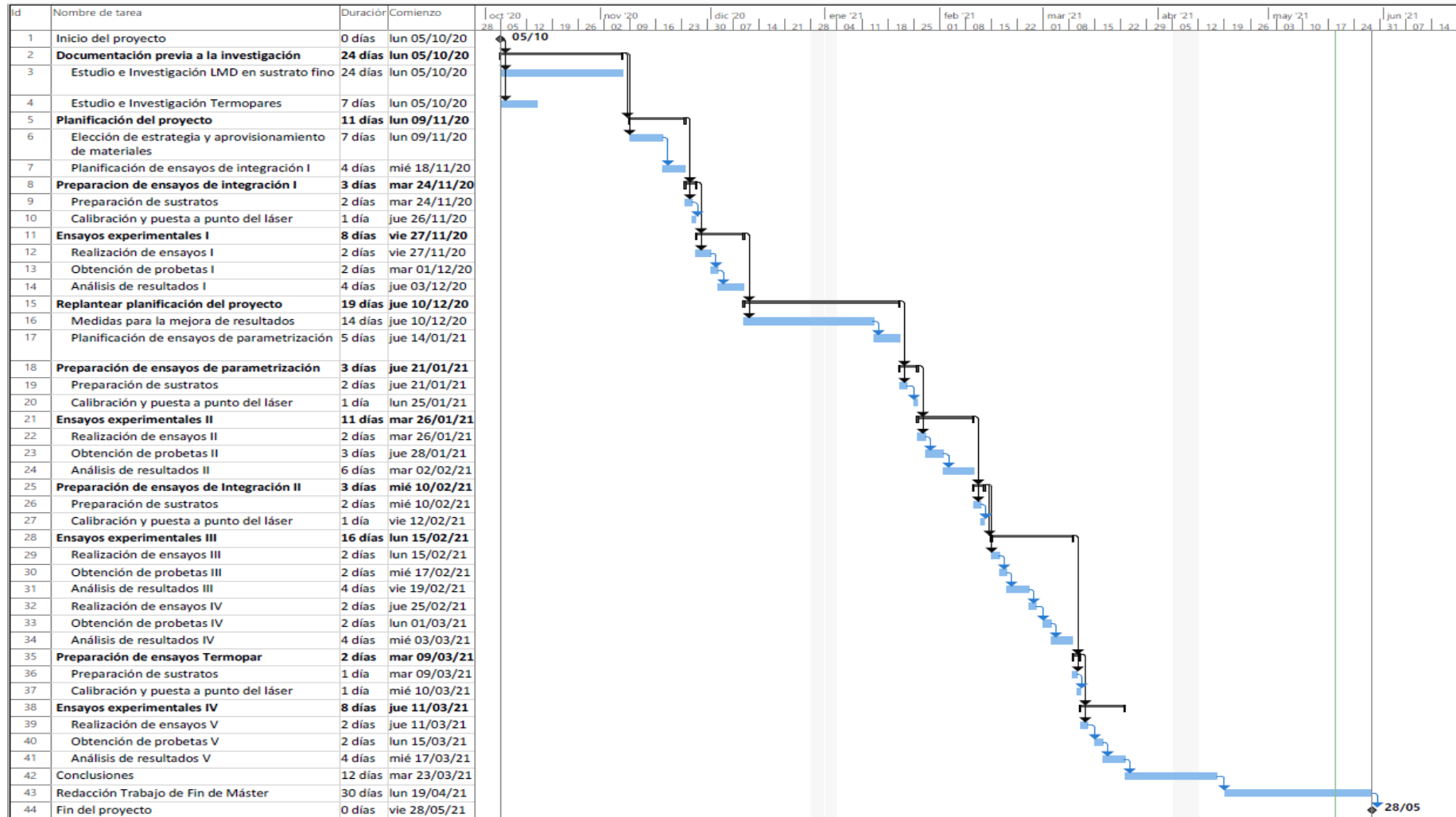
### **8.1.11 Ensayos experimentales IV**

Los últimos ensayos dan como resultado la pieza demostradora. Estos se realizan sobre termopares que son recubiertos por el material aportado a la vez que están en funcionamiento midiendo las temperaturas que se dan en el proceso de aporte. Finalmente se obtienen y analizan las muestras al igual que en los ensayos anteriores para ver los resultados finales y redactar las conclusiones finales del proyecto.

### **8.1.12 Redacción del Trabajo de Fin de Máster**

Para finalizar el proyecto, se procede a recoger y redactar toda la información obtenida a lo largo del proyecto en un documento de manera clara y concisa, exponiendo los pasos del proyecto y las conclusiones finales obtenidas.

## 8.2 Diagrama Gantt



## 9. Aspectos económicos

En este apartado se detalla el presupuesto del proyecto, compuesto por la suma de todos los costes relativos a la investigación llevada a cabo.

### Recursos humanos

Se detallan a continuación las horas invertidas por todas aquellas personas que han contribuido al proyecto y el coste por hora del trabajo realizado, definido como horas internas.

Horas internas	Salario	Tiempo	Total
Director del proyecto	50 €/h	50 h	2.500,00 €
Ingeniero senior	40 €/h	400 h	16.000,00 €
Ingeniero junior	20 €/h	250 h	5.000,00 €
Técnico de taller	25 €/h	30 h	750,00 €
			24.350,00 €

<b>Total recursos humanos</b>	<b>24.350,00 €</b>
-------------------------------	--------------------

### Recursos materiales

En esta partida se tienen en cuenta tanto las amortizaciones como los gastos. Las amortizaciones están formadas por equipos y licencias utilizadas en el taller de mecánica para llevar a cabo la investigación, y a diferencia de los gastos, son herramientas que se pueden volver a utilizar posteriormente para otros proyectos.

Maquinaria	Coste por hora	Tiempo (h)	Total
Centro láser	27,50 €	150	4.125,00 €
Sierra metalográfica	0,75 €	15	11,25 €
Encapsuladora	0,75 €	12	9,00 €
Pulidora	0,30 €	30	9,00 €
Microscopio confocal	25,00 €	40	1.000,00 €
Rectificadora	2,35 €	5	11,75 €
			5.166,00 €



Equipo informático	Coste por hora	Tiempo (h)	Total
Ordenador HP	0,10 €	150	15 €
Licencia Microsoft Office	0,10 €	100	10 €
Licencia LeicaScan	1,00 €	50	50 €
Licencia Siemens NX	1,00 €	50	50 €
			125 €

<b>Total amortizaciones</b>	<b>5.291,00 €</b>
-----------------------------	-------------------

En cuanto a los gastos, se incluyen los elementos que se han utilizado exclusivamente para este proyecto, sin poder ser utilizados en un futuro para otros trabajos.

Materiales	Coste	Total
Barra acero AISI H13	50,00 €	50,00 €
Polvo acero AISI H11	300,00 €	300,00 €
Cables simuladores de termopar	45,00 €	45,00 €
Disco de corte acero duro	120,00 €	120,00 €
Lijas de diamante	150,00 €	150,00 €
Paños de base metálica	100,00 €	100,00 €
Spray de diamante	80,00 €	80,00 €
Argón	200,00 €	200,00 €
Termopares	50,00 €	50,00 €
Resina para encapsular	35,00 €	35,00 €
Ataque Marble	40,00 €	40,00 €
		1.170,00 €

<b>Total gastos</b>	<b>1.170,00 €</b>
---------------------	-------------------

Finalmente, para definir el presupuesto total, se realiza la suma de los apartados definidos previamente formando los costes directos. A estos costes directos, se ha de sumar un porcentaje como costes indirectos que reflejen el consumo de agua, luz e incluso internet. Para este caso se ha fijado ese porcentaje en un 10 % debido al alto consumo eléctrico de la maquinaria empleada. También se ha de reservar una parte del presupuesto, en este caso un 5% relativo a imprevistos que haya que hacer frente. Por último, se suma el porcentaje correspondiente al IVA y se calcula el presupuesto final.

<b>Subtotal 1 (Costes directos)</b>	30.811,00 €
Costes indirectos (10%)	3.081,10 €
<b>Subtotal 2 (Costes totales)</b>	33.892,10 €
Imprevistos (5%)	1.694,61 €
<b>Subtotal 3</b>	35.586,71 €
IVA (21%)	7.473,21 €
<b>TOTAL</b>	<b>43.059,91 €</b>

## 10. Análisis de riesgos

Llevar a cabo este proyecto conlleva asumir ciertos riesgos, ya sean para la maquinaria como para la salud del operario o ingeniero que realice las tareas. Por eso, es muy importante conocer de antemano los riesgos que supone el uso de ciertas máquinas o la manipulación de ciertos materiales para evitar o prevenir en la medida de lo posible que estos problemas sucedan.

### 10.1 Análisis de riesgo de objetivos

En cuanto al riesgo de resultados y objetivos del proyecto, se corre el peligro de no lograr los hitos necesarios a tiempo y por tanto no cumplir los objetivos establecidos, pudiendo crear un exceso económico en la inversión o simplemente no logrando acabar.

Además, existe la posibilidad de haber seleccionado materiales que no sean especialmente adecuados para el proceso de aporte que se lleva a cabo. Aun sabiendo que son materiales ampliamente utilizados en el ámbito de reparación y recubrimiento de piezas de alto valor añadido con el método de aporte por láser, puede que para este caso en concreto haya algún otro acero que se adecúe mejor a las necesidades del proyecto.

En cuanto a los ensayos, existe el riesgo de no conseguir cubrir todo el sensor lograr una integración del sensor cuya microestructura presente grietas y poros siendo así totalmente inservible. Esto podría ocurrir debido a una mala selección de parámetros de aporte o por seguir una estrategia errónea durante el proceso de aporte. También podría suceder que el número de ensayos realizados sea insuficiente para poder obtener unos datos válidos y unas conclusiones relevantes, siendo necesarias unas nuevas propuestas para más ensayos.

En las tablas mostradas a continuación, se realizará una evaluación de los riesgos mencionados en cada apartado, valorando la posibilidad de que ocurra el riesgo y el impacto que este produciría en el proyecto. Las valoraciones contemplan un rango del uno al cinco, donde 1 es el valor mínimo y 5 el máximo.

Riesgo	Impacto	Probabilidad	Acción correctora
No lograr una integración exitosa del sensor	4	3	Replantear los ensayos y definir una estrategia de aporte nueva
Mala elección de los materiales de aporte	4	1	Realizar un estudio bibliográfico más profundo acerca del tema
Número de ensayos insuficiente	3	2	Diseñar una estructura de ensayos más amplia
No lograr cumplir a tiempo los plazos establecidos	2	4	Planificar los ensayos a realizar en plazos más realistas

## 10.2 Análisis de riesgo en máquinas y prevención

El riesgo en máquinas y prevención engloba los fallos que se pueden producir en la maquinaria ya sea por fallo propio de la máquina como por un mal uso por parte del usuario y los riesgos que supone someterse a una avería de este tipo. También, las medidas preventivas que se han de tomar para evitar en medida de lo posible cualquier incidente de este tipo que pueda suceder.

El generador láser es uno de los elementos más peligrosos que hay, ya que un mal funcionamiento del mismo puede ser muy perjudicial para la salud del manipulador de la máquina y para el resto de trabajadores que estén en puestos cercanos. El hecho de trabajar con una potencia mayor puede producir una avería en la máquina por sobrecalentamiento y es por eso que esto se evita con un sistema de refrigeración conectado a él. Mediante este sistema se asegura que el generador trabaje en un rango de temperaturas adecuadas para evitar averías por sobrecalentamiento.

El alimentador de polvo puede provocar efectos indeseados en el aporte de la pieza si no se ha manipulado correctamente. Esto puede ser debido a posibles restos de otro material en polvo tras una limpieza deficiente del alimentador, produciendo aporte de una mezcla de materiales. A parte de la limpieza, en los discos de alimentación se pueden llegar a producir obstrucciones que hacen que no llegue el polvo suficiente a la boquilla, inyectando una cantidad menor de polvo que el deseado.

A la hora de preparar las probetas, la sierra metalográfica es una herramienta muy utilizada y que su uso conlleva ciertos riesgos. Una mala fijación del disco de corte o un golpe del mismo contra la pieza puede resultar en una rotura del mismo. Además, los restos de material pueden salir disparados al realizar un corte. Por eso, hay una compuerta de seguridad que siempre ha de estar cerrada antes de poner en funcionamiento de la sierra. Sucede algo similar con la rectificadora, una bajada excesiva de la muela puede producir quemaduras en la pieza o incluso la rotura de la muela y para su uso la compuerta debe estar cerrada, evitando así salpicaduras de material.

Por último, hay maquinaria cuyo uso es delicado como el caso de las de metrología. El microscopio confocal tiene unos lentes muy delicados que con un mal uso se pueden rayar quedando inservibles. Estas averías supondrían un sobrecoste económico y sobre todo un importante retraso que dificultaría lograr los objetivos a tiempo.

Riesgo	Impacto	Probabilidad	Acción correctora
Sobrecalentamiento del láser	5	1	Conexión obligatoria del refrigerador
Mezcla de material en la tolva	5	2	Limpieza exhaustiva de la tolva
Mala alimentación del disco del alimentador	3	1	Limpieza del disco o sustitución de pieza
Daños en la sierra metalográfica	4	1	Cierre de la compuerta obligatorio
Daños en la rectificadora	3	1	Cierre de la compuerta obligatorio
Daños en las lentes del microscopio	5	1	Uso obligatorio de topes protectores de lentes

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

El material utilizado en este proyecto, en general no es peligroso a la hora de manipularlo exceptuando casos como el del ataque químico o el material en polvo. El mayor peligro está en inhalar este polvo, ya que se trabaja con acero en polvo de dimensiones granulares muy pequeñas que pueden interferir en las vías respiratorias perjudicando gravemente la salud de quien lo manipula.

El polvo AISI H13 utilizado para crear los cordones y el recubrimiento sobre el sensor tiene una granulometría de 53-125  $\mu\text{m}$ . Este material puede ser inhalado involuntariamente, teniendo en cuenta que es cancerígeno. Para prevenir este riesgo, se debe evitar el contacto directo utilizando guantes de látex para evitar tener restos de polvo en las manos y sobre todo se deben usar máscaras con filtros de diámetros pequeños para no inhalar polvo al respirar. También es recomendable el uso de gafas de protección.

El ataque químico utilizado es el Marble, un producto que debe evitar el contacto con la piel y sobre todo con los ojos. En este caso no es necesario el uso de una máscara con filtros, pero es totalmente obligatorio el uso de guantes de látex y sobre todo las gafas de protección para prevenir quemaduras en la piel o daños irreversibles en los globos oculares.

Otro de los materiales utilizados en el proyecto es el gas argón, utilizado tanto para la protección como para el arrastre del polvo en el aporte. Este es un argón de un alto grado de pureza. La fuga de este gas en un recinto cerrado podría provocar asfixia a los trabajadores que estuvieran en ese momento. Además, una prolongada exposición al gas durante su uso puede provocar mareos o dolores de cabeza, siendo un caso grave el de la esterilidad.

Riesgo	Impacto	Probabilidad	Acción correctora
Polvo AISI H13	5	1	Uso de máscara con filtros, guantes de látex y gafas
Ataque químico "Marble"	4	2	Uso de guantes de látex y gafas
Gas Argón	4	1	Sistema a prueba de fugas

## 11. Discusión y conclusiones

### 11.1 Discusión

Como se ha podido observar en los resultados obtenidos a lo largo de este estudio, la tecnología de aporte por láser es capaz de realizar la integración de sensores tipo termopar con cubierta de acero inoxidable AISI 316 en sustratos de acero de herramientas AISI H11 mediante el aporte de acero en polvo AISI H13. Mediante esta integración, se logra que haya un termopar operativo capaz de medir temperaturas integrado a un sustrato, lo que se pretende extender a un troquel de estampación en caliente. Con las exigencias de optimizar procesos de producción y mejorar la vida útil de las herramientas, esta obtención de datos de temperatura en tiempo real a lo largo del proceso de estampación en caliente hace que estos objetivos se puedan alcanzar con una menor dificultad.

El uso de la tecnología LMD para este caso en concreto es especialmente idóneo, pensando más en el caso de integrar el sensor en el mismo troquel que lo que se ha realizado en este proyecto. Las características del *Laser Metal Deposition* hacen que sea posible aportar en geometrías sumamente complejas, logrando la integración de un sensor en un troquel por fabricar o incluso ya fabricado, evitando tener que hacer otro solo para tener esta característica de medición de temperatura y retirando uno al que todavía le quedan largas tiradas de vida útil. Aun así, como se ha podido ver, las características del láser son muy importantes y sensibles, junto a los parámetros de aporte utilizados en los procesos de aporte. Por lo tanto, es necesaria la optimización de los parámetros de aporte y una zona de trabajo del láser dentro de su rango de estabilidad, para una integración óptima del termopar.

De todos modos, las dificultades que presenta el LMD respecto a las ventajas que otorga son perfectamente asumibles a pesar del esfuerzo que requiere mejorar el proceso y, sobre todo, la inversión económica inicial. Además, hay que tener en cuenta que posiblemente no será suficiente el uso de la tecnología láser para una óptima integración del termopar, sino que también puede necesitar un posterior mecanizado para finalizar del todo la fabricación del troquel y ponerlo en funcionamiento. Aun así, el LMD permite generar geometrías complejas, es capaz de manipular materiales difíciles de mecanizar e incluso aporta la posibilidad de trabajar con más de una aleación metálica a la vez para mejorar las propiedades de la pieza. También consigue que la zona de afectación térmica sea mínima alrededor de la zona de aporte, característica clave en este caso, y consigue centrar toda la energía aportada en un área muy pequeña.

A lo largo del proyecto se han realizado varios ensayos, integrar cables de diferente diámetro, obteniendo los parámetros que hacen posibles la integración de todos los diámetros con los que se ha ensayado. Los cables de mayor diámetro son los que mejores resultados presentan, aunque también se ha logrado la integración de los cables de menor diámetro, cuya dificultad es mayor debido a su fino espesor. Esto corrobora la validez de los métodos de aporte por láser para llevar a cabo estas complicadas tareas de fabricación.

## 11.2 Conclusiones

Este proyecto evalúa la posibilidad de integración de sensores del tipo termopar en útiles de troquelaría de acero AISI H11 de estampación en caliente, mediante aporte por láser o LMD. Se estudia el recubrimiento de estos termopares con cubierta de acero inoxidable AISI 316 sobre sustrato de acero de herramientas AISI H11, mediante acero en polvo AISI H13.

En los ensayos realizados, se ha seguido un proceso iterativo, reconfigurando las estrategias a utilizar y los parámetros de aporte prácticamente de un set de ensayos a otro. Hay que mencionar que se ha logrado una continua mejora desde los primeros ensayos de recubrimiento del cable de aislamiento mineral, donde se perforaban completamente las vainas protectoras de los cables de  $\varnothing 3$  y  $\varnothing 4,5$  mm y finalmente se han logrado unos parámetros válidos para integrar aún mejor los cables de  $\varnothing 6$  mm de diámetro, integrar de manera adecuada los de  $\varnothing 4,5$  mm y lograr integrar los de  $\varnothing 3$  mm, aunque estos con una mayor dificultad.

En el cable de  $\varnothing 4,5$  mm diámetro, se ha realizado la integración con un solape del 60% en la primera capa, logrando unos mejores resultados de fusión entre cordones y entre cordón y cubierta, creando una continuidad entre cordones y siendo la penetración de la primera capa adecuada para proporcionar una buena unión sin penetrar la capa protectora del cable.

Se observan faltas de fusión entre sustrato y cubierta en ambos cables, debidos a un alineamiento deficiente del cable con el sustrato, una potencia insuficiente para aportar en esa zona y a trabajar con una boquilla discreta. Es necesario mantener un aporte energético mayor para solventar las faltas de fusión con el sustrato y el cable. Además, al estar en contacto con el sustrato la superficie para disipar el calor aumenta por lo que es una medida congruente.

El cable de  $\varnothing 3$  mm de diámetro es el que más defectos presenta debido a su dificultad de integración. Además de las faltas de fusión, se localiza material en polvo sin fundir en la primera capa. Conviene aumentar ligeramente la potencia para solventar este problema, pero sin llegar a penetrar demasiado en la vaina protectora. También se puede aumentar el solape al 60% debido a los buenos resultados obtenidos en el cable de  $\varnothing 4,5$  mm.

Finalmente, se ha realizado la integración de un termopar variable en diámetro como pieza demostradora con los parámetros calculados en los ensayos de recubrimiento de cable. Empleando los parámetros obtenidos para el caso de  $\varnothing 3$  mm se consigue realizar la integración de un termopar de forma que este quede adherido al sustrato y con un recubrimiento de polvo fundido, sin perjudicar el funcionamiento del mismo. Este termopar integrado presenta algunos defectos a simple vista como una zona quemada o un pico de material fundido, que se pueden solventar utilizando otra estrategia de trayectoria de aporte y solucionando los defectos detectados anteriormente en el aporte de los cables de  $\varnothing 3$  mm de diámetro.

Por lo tanto, ha de tenerse en cuenta que el LMD es una tecnología válida para trabajar con estos materiales en las superficies a las que se ha hecho frente, haciendo posible la integración de un sensor de temperatura en troqueles, con los beneficios económicos que eso conlleva si se logra expandir este estudio a casos de troqueles reales con su geometría



compleja, ya sea por optimizar procesos de producción como por aumentar la vida útil de las herramientas de estampación en caliente.

## 12. Bibliografía

- [1] Silfvast W. T., *Laser fundamentals, vol. 2*, Cambridge University, Cambridge (2008)
- [2] Mercado J. Á., (2016). Jose Angel Mercado S. A.: *Todo lo que necesita saber sobre el corte por láser*.
- [3] artech.es. Art-Tech Soldadura: *Soldadura láser manual ó automatizada. Una tecnología de fácil uso, a un coste asumible y de retorno de inversión rápido*.
- [4] Leitz K. H., Singer P., Plankensteiner A., Tabernig B., Kestler H., Sigl L. S., “Multi-physical simulation of selective laser melting”, *Metal Powder Report* **72**, 331-338 (2017).
- [5] Toyerskani E., Khajepour A., Corbin S., *Laser Cladding, 1 ed.*, CRP Press LLC, Boca Raton (2005).
- [6] Ruiz J. E., Cortina M., Arrizubieta J. I., Markaida J., Ukar E., Lamikiz A., “Analysis of helium used as protective gas in Laser Metal Deposition of Ti6Al4V highly reactive material”, *Procedia Manufacturing* **41**, 984-991 (2019).
- [7] maquinasyequipos.com, (2010). Máquinas y Equipos: *Micromecanizado y texturizado de moldes con láser de nanosegundo...y hasta femtosegundo*.
- [8] Avilés R., *Métodos de cálculo de fatiga para ingeniería. Metales*, Editorial Paraninfo, Bilbao (2015).
- [9] Markaida J., *Fabricación de recubrimientos de alta resistencia por LMD para estampación en caliente* (2020).
- [10] Rofin Laser Macro, *Rofin FL Series. High Brightness Fiber Lasers – Precise, Fast and Reliable*, ROFIN-SINAR Laser GmbH, Hamburgo (2011)
- [11] nippongases.com. Nippon Gases: The Gas Professionals: *Argón (Ar)*.
- [12] hbm.com. HBK company: *Sensores de presión*.
- [13] Rechner-sensors.com. Rechner Sensors: *El sensor de temperatura*.