

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

FABRICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS  
DE ALTA RESISTENCIA POR LMD  
PARA ESTAMPACIÓN EN CALIENTE

**Alumno:** Markaida Ormaetxea, Jon  
**Director:** Lamikiz Mentxaka, Aitzol  
**Departamento:** Mecánica  
**Curso:** 2019 - 2020

Bilbao, 7 de julio de 2020



## DATOS BASICOS DEL PROYECTO

**Alumno:** Jon Markaida Ormaetxea

**Director Técnico:** Aitzol Lamikiz Mentxaka

**Departamento:** Ingeniería Mecánica

**Título del proyecto:** Fabricación de recubrimientos de alta resistencia por LMD para estampación en caliente.

**Plazo de ejecución:** 30/09/2019 a 07/07/2020

**Laburpena:** Beroko estanzazio prozesuak txapa konformaketaren fabrikazio teknologia da, deformatu beharreko materiala aurreberotu ostean pieza konformatu eta tenplatu egiten da; non trokelaren gune aktiboak higadura latzak jasaten dituen. Balio gehigarri altuko trokel hauen bizi zikloa luzatzeko, takoak kolpeak jasateko ijeztutako altzairu harikor batekin fabrikatzea proposatzen da, gainetik laser prozesu gehigarriaren bidez (LMD) errendimendu altuko estaldura bat gehituko zaio bere gogortasunari esker abrasio bidezko higadura minimizatzen dituen. Horretarako gradiente funtzional (FMG) bidezko estaldura egitea planteatzen da, material ezberdinak konbinatuz, piezaren konposizioa aldatu ahala barne propietateak aldatuko dituen.

**Hitz gakoak:** laser; fabrikazio gehigarria; trokel; beroko estanzazioa; gradiente funtzionaleko materialak

**Resumen:** El proceso de estampación en caliente es una tecnología de fabricación de conformado de chapas, en los que se calienta previamente el material a deformar y se procede al conformado y temple de la pieza; donde la parte activa de los troqueles sufre un gran desgaste. Para aumentar la vida de estos útiles de alto valor añadido, se propone fabricar los tacos con un material base de acero laminado dúctil que pueda resistir los continuos impactos de la estampación, sobre el que se aportará mediante aporte por láser (LMD) un recubrimiento de alto rendimiento que gracias a su alta dureza minimice el desgaste por abrasión. Para ello se plantea realizar un recubrimiento con gradiente funcional (FGM), combinando distintos materiales, dotando así a la pieza de distintas propiedades a medida que varía la composición.

**Palabras clave:** láser; fabricación aditiva; troquel; estampación en caliente; materiales con gradiente funcional

**Abstract:** The hot stamping process is a manufacturing technology for sheet metal forming, in which the material to be deformed is heated beforehand and the part is formed and hardened; where the active part of the dies suffers a great deal of wear. In order to increase the life of these high added value tools, it is proposed to manufacture the blocks with a ductile laminated steel base material that can resist the continuous impacts of the stamping, on which a high performance coating will be provided by means of a laser contribution (LMD) which, thanks to its high hardness, minimizes wear by abrasion. For this purpose, a coating with a functional gradient (FGM) is proposed, combining different materials, thus providing the part with different properties as the composition varies.

**Keywords:** laser; additive manufacturing; die; hot stamping; functionally graded materials

Jon Markaida Ormaetxea



## Agradecimientos

---

Este trabajo fin de máster realizado en la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la UPV/EHU es un proyecto en el que participaron distintas personas directa o indirectamente, acompañándome en la corrección y solución de problemas, y teniendo paciencia conmigo. Este trabajo fin de máster es fruto de la competencia y la experiencia de muchas personas que me han acompañado durante todo el desarrollo y conclusión del proyecto.

En primer lugar, a mi director del trabajo fin de máster, Dr. Aitzol Lamikiz Mentxaka, mi más sincero agradecimiento por confiar y asignarme este proyecto, por su valiosa dirección e inestimable ayuda durante toda la evolución del proyecto y conclusión del mismo.

Al equipo de investigación láser de la Escuela de Ingeniería de San Mames, un especial agradecimiento por el continuo apoyo, enseñanzas y colaboración que hicieron posible el desarrollo de este trabajo fin de máster. Desde luego, agradecer a Magdalena, Jose Exequiel e Iker por su apoyo en la iniciación en esta área de investigación y ayuda en otros proyectos. Y en especial, agradecer a Marta y Jon Iñaki por sus consejos y paciencia en el transcurso de este trabajo.

Finalmente, me gustaría agradecer a las personas e instituciones sin cuyo apoyo este trabajo no hubiese sido posible, y de forma especial a Amaia Alberdi y Mikel Ortiz por su apoyo técnico en esta labor. Este trabajo fue amparado por el Aula Tecnalia, a la que debo agradecer haber facilitado los medios necesarios para el fin de este proyecto. Esta Aula financiada íntegramente por el centro tecnológico Tecnalia, se encuentra en la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la UPV/EHU.



## Índice

---

1. Lista de tablas, ilustraciones, gráficas y acrónimos .....	9
1.1. Tablas .....	9
1.2. Gráficas .....	9
1.3. Ilustraciones.....	10
1.4. Acrónimos.....	12
2. Introducción .....	13
3. Contexto .....	15
4. Objetivos y alcance del trabajo .....	17
4.1. Objetivos.....	17
4.2. Alcance .....	18
5. Descripción de requerimientos y análisis del estado del arte .....	19
5.1. Estampación en caliente .....	19
5.2. Tecnologías láser.....	22
5.3. Aporte por láser o <i>Laser Metal Deposition (LMD)</i> .....	31
5.4. <i>Functionally Graded Materials (FGM)</i> .....	37
5.5. Diseño de experimentos (DOE).....	39
5.6. Descripción de equipos y materias primas necesarias .....	42
6. Metodología .....	61
6.1. Planificación I.....	62
6.2. Preparación previa al ensayo I.....	63
6.3. Ensayo de control .....	65
6.4. Obtención de resultados I .....	67
6.5. Ensayo de recubrimiento I.....	69

6.6.	Obtención de resultados II .....	71
6.7.	Planificación II.....	73
6.8.	DOE.....	74
6.9.	Ensayo de recubrimiento II.....	80
6.10.	Obtención de resultados III .....	81
7.	Resultados.....	83
7.1.	Resultados del ensayo de control .....	83
7.2.	Resultados del Recubrimiento I.....	84
7.3.	Resultados del DOE.....	87
7.4.	Resultados del Recubrimiento II.....	90
8.	Descripción de tareas. Diagrama Gantt.....	93
8.1.	Descripción de tareas .....	93
8.2.	Diagrama Gantt.....	95
9.	Presupuesto.....	97
10.	Análisis de riesgos.....	101
10.1.	Análisis de riesgo de objetivos .....	101
10.2.	Análisis de riesgo en máquinas y prevención.....	101
10.3.	Análisis de riesgo de los materiales y su prevención.....	103
11.	Discusión y conclusiones .....	105
11.1.	Discusión .....	105
11.2.	Conclusiones .....	106
12.	Bibliografía.....	107



# 1. Lista de tablas, ilustraciones, gráficas y acrónimos

## 1.1. Tablas

Tabla 1. Tecnologías láser en la industria.....	26
Tabla 2. Composición química (%) común del acero F – 114 .....	54
Tabla 3. Composición química (%) común del polvo Stellite 6 .....	55
Tabla 4. Composición química (%) común del polvo de carburo de tungsteno.....	56
Tabla 5. Parámetros base de aporte del Stellite 6.....	63
Tabla 6. Cálculo de revoluciones del alimentador de polvo I.....	63
Tabla 7. Parámetros de ensayo de control.....	66
Tabla 8. Parámetros de aporte de recubrimiento I .....	69
Tabla 9. Parámetros de ensayo DOE .....	74
Tabla 10. Cálculo de revoluciones de alimentador de polvo II.....	75
Tabla 11. Datos de los ensayos en los gráficos de Design Expert 12 .....	78
Tabla 12. Parámetros de aporte del recubrimiento II.....	80
Tabla 13. Microdurezas de recubrimiento I .....	85
Tabla 14. Geometría de cordones.....	88
Tabla 15. Desglose de recursos humanos .....	97
Tabla 16. Desglose de amortizaciones .....	97
Tabla 17. Desglose de gastos.....	98
Tabla 18. Presupuesto final .....	99
Tabla 19. Análisis de riesgos de objetivos .....	101
Tabla 20. Análisis de riesgo de la maquinaria del proyecto.....	102
Tabla 21. Análisis de riesgo de materias primas .....	103

## 1.2. Gráficas

Gráfica 1. Linealidad del alimentador de polvo.....	76
Gráfica 2. Caracterización del Stellite 6 .....	89
Gráfica 3. Planificación del proyecto, Diagrama Gantt .....	95

### 1.3. Ilustraciones

Ilustración 1. Piezas de estampación en frío .....	19
Ilustración 2. Método directo e indirecto de la estampación en caliente .....	20
Ilustración 3. Estructura de automóvil .....	21
Ilustración 4. Generación láser .....	22
Ilustración 5. Haz láser y luz blanca.....	22
Ilustración 6. Láseres de distinta zona electromagnética .....	23
Ilustración 7. Distancia focal efectiva del haz láser .....	23
Ilustración 8. Elementos del sistema láser .....	24
Ilustración 9. Medio activo .....	25
Ilustración 10. Bombeo óptico del sistema láser .....	25
Ilustración 11. Esquema de corte por láser .....	27
Ilustración 12. Corte por láser .....	27
Ilustración 13. Texturizado láser para moldes.....	28
Ilustración 14. Engranaje marcado.....	28
Ilustración 15. Molde pulido por láser.....	29
Ilustración 16. Esquema de pulido láser.....	29
Ilustración 17. Soldadura láser.....	30
Ilustración 18. Laser Metal Deposition .....	31
Ilustración 19. Selective Laser Melting.....	32
Ilustración 20. Blisk de Inconel 718.....	33
Ilustración 21. Troquel de estampación en caliente .....	34
Ilustración 22. Esquemas de recubrimientos convencionales y FGM.....	37
Ilustración 23. Blade FGM del sector aeronáutico fabricado por LMD.....	38
Ilustración 24. Diagrama de un DOE.....	39
Ilustración 25. Programa Design Expert 12.....	40
Ilustración 26. Representaciones gráficas del Design Expert 12.....	41
Ilustración 27. Rofin FL040 .....	42
Ilustración 28. Esquema de un generador láser de fibra .....	43
Ilustración 29. Descomposición del haz láser al llegar al sustrato.....	44
Ilustración 30. Alimentador de polvo Sulzer Metco Twin 10-C.....	45
Ilustración 31. Sistema de refrigeración KKT Kraus OLB-5.....	46
Ilustración 32. Centro de fabricación aditiva Kondia Aktinos 500 .....	47
Ilustración 33. Cinemática del centro de fabricación aditiva .....	48
Ilustración 34. Esquema de la boquilla.....	49

Ilustración 35. Boquilla o nozzle.....	50
Ilustración 36. Distribución uniforme de polvo.....	50
Ilustración 37. Botellas de argón.....	51
Ilustración 38. Nippon Gases.....	53
Ilustración 39. Acero laminado F – 114.....	54
Ilustración 40. Polvo metálico para procesos de aporte por láser.....	55
Ilustración 41. Recubrimiento LMD de NiCrBSi con diferentes porcentajes de adición de WC en peso.....	56
Ilustración 42. Ataque químico metalográfico.....	57
Ilustración 43. Ataque electrolítico metalográfico.....	58
Ilustración 44. Obtención de las marcas para la medición de la dureza.....	59
Ilustración 45. Esquema de un durómetro.....	60
Ilustración 46. Escuela de Ingeniería de Bilbao UPV/EHU.....	61
Ilustración 47. Beneficios del proyecto.....	62
Ilustración 48. Esquema del ensayo de control.....	65
Ilustración 49. Figura 3D del ensayo de control diseñado.....	66
Ilustración 50. Esquema de secciones del ensayo de control.....	67
Ilustración 51. Lijas de pulidora metalográfica.....	68
Ilustración 52. Esquema recubrimiento I.....	70
Ilustración 53. Esquema de secciones del recubrimiento I.....	71
Ilustración 54. Estudio de microdurezas.....	72
Ilustración 55. Esquema del DOE.....	76
Ilustración 56. Características del aporte.....	77
Ilustración 57. Microscopio Confocal Leica DCM 3D.....	81
Ilustración 58. Sección Recubrimiento I.....	84
Ilustración 59. Grietas Recubrimiento I.....	84
Ilustración 60. Cordones de caracterización del Stellite 6.....	87
Ilustración 61. Sección Recubrimiento II.....	90
Ilustración 62. Grietas Recubrimiento II.....	90

#### **1.4. Acrónimos**

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

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

FGM: Materiales de gradiente funcional (*Functionally Graded Materials*).

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

DOE: Diseño de experimentos (*Design Of Experiments*).

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

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

CNC: Control numérico por ordenador (*Computer Numerical Control*).

LCD: Pantalla de cristal líquido (*Liquid Crystal Display*).

FEPA: Federación Europea de Productos Abrasivos.

## 2. Introducción

El proceso de estampación en caliente es una tecnología de fabricación de conformado de chapas metálicas, habitualmente de aceros, en los que se calienta previamente el material a deformar y mediante la estampación se procede al conformado y temple de la pieza. Este proceso es muy común en el sector de la automoción y es fruto de la necesidad de reducir el peso del vehículo, asegurando la fiabilidad de su estructura y su resistencia frente a los choques. Por otra parte, cada día existen mayores exigencias en la complejidad de los útiles y la resistencia que han de soportar para lograr un conformado en materiales cada vez más resistentes en el sector de la estampación; logrando así aceros ultra resistentes en piezas de pesos reducidos. Para poder alcanzar la resistencia y espesores deseados para las piezas, las partes activas de los troqueles de la estampación están sometidas a un gran desgaste debida a la abrasión a altas temperaturas y la presión del proceso en el momento de ser conformado [1]. Todo este desgaste, hace totalmente necesario el tener que reemplazar las herramientas de la estampación en contacto con la chapa tras cien o doscientos mil ciclos de piezas estampadas dependiendo de las características de la pieza y del proceso para mantener la exactitud en las mismas.

Aumentar la vida de las partes activas de los troqueles será de gran interés, puesto que estos útiles son piezas de alto valor añadido, es decir, elementos de alta precisión y difíciles de mecanizar, por lo que son muy caros. Para lograr maximizar la vida de los útiles, los materiales seleccionados para los tacos han de ser resistentes al choque térmico y mecánico para evitar la aparición de grietas. Además, los utillajes deben tener una gran resistencia al desgaste, es por ello que en su fabricación se emplean materiales de alta dureza. Dado que se emplean en producción seriada, deben tener también una alta resistencias a la fatiga térmica. Por otra parte, es necesario maximizar la conductividad térmica de los troqueles ya que de esta forma se asegura el enfriamiento rápido necesario para obtener la transformación martensítica de los aceros estampados, permitiendo así el tratamiento térmico deseado. Además, un enfriamiento eficiente resulta en una reducción de tiempos de proceso y, por tanto, una mejora de la eficiencia del mismo. Todas estas especificaciones de proceso conllevan la necesidad de emplear materiales costosos y difíciles de mecanizar, disparando así los gastos de fabricación de los útiles, pero minimizando los gastos por mantenimiento de la producción.

En este proyecto, se plantea fabricar los tacos con un material base de acero laminado dúctil que pueda resistir los continuos impactos de la estampación; sobre el que se aportará, mediante *Laser Metal Deposition* (LMD), un recubrimiento de alto rendimiento que gracias a su alta dureza minimice el desgaste por abrasión.

El proceso de aporte por láser o *Laser Metal Deposition* es una tecnología de fabricación aditiva la cual permite la fabricación de piezas de geometrías complejas que serían difíciles de fabricar mediante métodos convencionales. Dicho proceso se basa en la generación de un baño fundido mediante un haz láser en un material base y en el cual se introduce polvo metálico suministrado por un gas de arrastre inerte. De esta forma, se producen sucesivos cordones de soldadura que debidamente solapados forman una capa de aporte; de igual manera, superponiendo sucesivas capas de aporte, se obtiene la geometría deseada.

Durante estos últimos años, han sido realizados numerosos estudios sobre el comportamiento de las propiedades de recubrimientos con gradiente funcional (*Functionally Graded Materials* o FGM) logrados mediante los procesos de aporte por

láser [2]. Los recubrimientos con gradiente funcional, combinan diferentes materiales con distinta naturaleza, mezclándolos gradualmente variando su composición, dotando así a la pieza de distintas propiedades a medida que varía la composición, como pueda ser en este proyecto la transición de un material dúctil en el entorno del material base a una zona de alta dureza en la superficie del mismo. Generalmente, el empleo de este tipo de tecnología se realiza para lograr que el material base consiga una funcionalidad diferente como mayor resistencia a la corrosión, mayor dureza o barrera térmica por dar unos ejemplos.

De esta forma, en este trabajo se propone el empleo de recubrimientos FGM realizados mediante procesos de aporte por láser sobre la superficie activa de los troqueles que doten a la superficie de una dureza gradual. Mediante la aplicación de estos recubrimientos de alto rendimiento, se obtiene un aumento de vida útil de la parte activa de los troqueles, minimizando la necesidad de ser reemplazados. Un recubrimiento de alta dureza puede llegar a aguantar un mayor número de golpes sin la necesidad de reparar las superficies.

El estudio “Fabricación de recubrimientos de alta resistencia por LMD para estampación en caliente” está dirigido a dar una solución a esta necesidad. La finalidad principal de este proyecto, es la obtención de los parámetros de aporte, las estrategias y los materiales adecuados para fabricar un recubrimiento de gradiente funcional de alta resistencia por LMD para el empleo sobre troqueles de estampación en caliente. En esta obtención se pretende asegurar la calidad del mismo, evitando la aparición de poros y grietas. Para ello, se realizarán una serie de tareas tales como un estudio de los materiales adecuados para la fabricación de recubrimientos de alta dureza, investigación de los parámetros a utilizar para su fabricación con esos materiales, estudio de las distintas estrategias para el LMD y caracterización del recubrimiento (metalografías, durezas, etc.). De esta manera, se pretende analizar la capacidad del LMD para lograr dichos objetivos, lograr las combinaciones de los materiales más apropiadas y observar los beneficios que suponen estos recubrimientos en las propiedades de los troqueles de estampación en caliente.

### 3. Contexto

La ligereza de los vehículos, tanto para los vehículos eléctricos como para los de combustión, es imprescindible para el transporte; puesto que, la cantidad de energía necesaria para mover dichos medios de transporte varía en gran medida dependiendo del peso a mover. Los aceros de ultra alta resistencia, se utilizan cada vez más para producir componentes de automóviles debido al desarrollo de la reducción de peso del automóvil, por lo que la tecnología de la estampación en caliente se desarrolla rápidamente.

La rápida evolución de esta tecnología, hace que los requerimientos de los troqueles, elementos de alto valor añadido, sean más complejos y difíciles de realizar; disparando así el coste de fabricación del utillaje. Por lo que, se ha visto la necesidad de perfeccionar la fabricación de los troqueles de la estampación en caliente, realizando una mayor inversión inicial en su fabricación, para la obtención de unos mejores resultados en el conformado de chapa y un menor desgaste de la parte activa de los troqueles. Gracias a ello, se consiguen reducir gastos en mantenimiento de los troqueles y un aumento considerable de su ciclo de vida, logrando así alargar el tiempo para el reemplazo del utillaje y rentabilizar en mayor medida estos elementos de alto valor añadido [3].

El material, juega un papel muy importante en la calidad del troquel. Además, los actuales y exigentes requerimientos de estos elementos hacen que sea necesaria una transición de propiedades desde la superficie hasta la zona que absorberá el golpe de la estampación. Teniendo en cuenta esto, se ha visto la necesidad de la combinación de distintos materiales, así como su cambio gradual en la composición de estos materiales. Para ello son necesarios los materiales con gradiente funcional o FMG, los cuales gracias al cambio de composición gradual consiguen una variación de sus propiedades más continua que con un cambio drástico de material, como se ha podido ver en numerosos estudios de este ámbito estos últimos años [4].

Detectada esa necesidad, se ha visto una oportunidad en las tecnologías de aporte por láser o LMD, las cuales, consiguen realizar este tipo de cambio gradual de composición con relativa sencillez. En estas tecnologías el cambio de composición varía respecto a la composición de polvo metálico que aporta el gas de arrastre, el cual se controla desde el alimentador de polvo. De esta manera, el alimentador de polvo únicamente ha de tener los materiales necesarios para el aporte y tendrá que controlar los flujos de cada uno de ellos para la variación de composición.





## 4. Objetivos y alcance del trabajo

### 4.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto, es la obtención de un recubrimiento FGM de alto rendimiento para troqueles de estampación en caliente, mediante el uso de tecnologías de fabricación aditiva.

Como ya se ha mencionado, los parámetros a la hora de realizar el aporte masivo, serán vitales para la obtención de un recubrimiento adecuado que cumpla con las especificaciones requeridas para los troqueles de los procesos de estampación en caliente.

- Para el presente estudio, se emplearán unos materiales adecuados para los troqueles de los procesos de estampación en caliente. Dichos materiales serán previamente seleccionados en base al estudio bibliográfico de las especificaciones requeridas para distintas zonas de los troqueles en estos procesos de estampación.
- Los parámetros de fabricación de LMD a utilizar para la realización del aporte masivo, es decir, para la ejecución del recubrimiento con gradiente funcional; son los utilizados hasta el momento en procesos de fabricación aditiva en este tipo de materiales.
- Con esta investigación, se pretenden buscar posibles mejoras o cambios en el recubrimiento de alto rendimiento como puedan ser un cambio de dureza gradual desde la superficie hasta el entorno dúctil del sustrato, el eludir la aparición de defectos como grietas o poros y la obtención de un recubrimiento con grandes prestaciones metalúrgicas para este tipo de procesos de estampación.

El presente estudio “Fabricación de recubrimientos de alta resistencia por LMD para estampación en caliente” tiene como objetivo la obtención de un recubrimiento de alto rendimiento que cumpla con las exigentes necesidades de los procesos de estampación en caliente, así como el lograr los parámetros óptimos para la realización de este aporte masivo.

## 4.2. Alcance

Una vez se han establecido todos los objetivos, se procede al desarrollo del estudio y planificación de estrategias a seguir en los diversos ensayos para la obtención exitosa de dichas metas.

Para dar comienzo al estudio, se realiza un estudio bibliográfico para identificar las necesidades y requisitos de un troquel de estampación en caliente. Esto, ayudará a identificar las propiedades que debe tener el recubrimiento de alto rendimiento y en la selección de materiales a utilizar para los ensayos que se realizarán posteriormente mediante LMD.

La selección de parámetros adecuados para la obtención exitosa del recubrimiento, se realiza en base a los parámetros utilizados anteriormente en este tipo de procesos de aporte por láser con este tipo de materiales.

Previo al aporte masivo final se realizan unos ensayos para la comprobación de los parámetros de aporte, en estos ensayos se analizan la integridad metalúrgica y la ausencia de grietas. Si esta prueba es exitosa se procederá al aporte masivo final, si no, se realizará a la caracterización del material para la obtención de los parámetros óptimos.

El aporte masivo final se realiza con los parámetros seleccionados previamente, el cual se le realiza un corte mediante electroerosión dada la dureza del recubrimiento aportado. Este corte se encapsula, lija y pule y posteriormente se efectúa un ataque electrolítico en un entorno de ácido oxálico. Se le realizará un análisis metalográfico a la probeta, analizando su estructura, dispersión de los materiales aportados, altura, porosidad, grietas y faltas de llenado. Tras eso se someterá a un análisis de microdurezas para la comprobación del cambio gradual de dureza en el cambio de composición sobre el aporte.

Cada uno de los ensayos realizados en el proceso contará con al menos dos cortes para analizar, con el fin de evitar singularidades y reforzar los resultados y conclusiones obtenidos, así como su repetitividad.

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

### 5.1. Estampación en caliente

Los procesos de estampación son técnicas empleadas en sectores muy diversos de fabricación de piezas de productos muy diferentes entre sí. Estos procesos se basan en la fabricación de piezas a partir de chapa metálica, siendo el sector de la automoción el ejemplo más común. Lo fundamental de este método de fabricación es que permite la producción seriada.

La estampación es un proceso de fabricación donde se conforman chapas metálicas después de haberlas sometido a grandes cargas de compresión. Dicha compresión, se lleva a cabo por los troqueles de la prensa, las cuales funcionan como moldes para las chapas a conformar. Sobre estos troqueles, se aplican cargas de forma progresiva o mediante percusión continua de una carga igual hasta la obtención de la pieza deseada. Uno de los útiles se deslizará por una guía (la estampa superior) y el otro se mantendrá estático (la estampa inferior). Existen dos tipos de procesos de estampación distintos actualmente, los procesos de estampación en frío y los procesos de estampación en caliente.

Los procesos de estampación en frío son técnicas de fabricación en los que los elementos a manipular están a baja temperatura, y se utilizan sobre chapas metálicas con espesores menores que los utilizados en los procesos de estampación en caliente. Estos procesos se realizan con 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 su “*Springback*” o capacidad de recuperación de la chapa estampada por los troqueles (véase Ilustración 1). Además, se obtienen mayor mecánica y precisión dimensional que en la estampación en caliente.

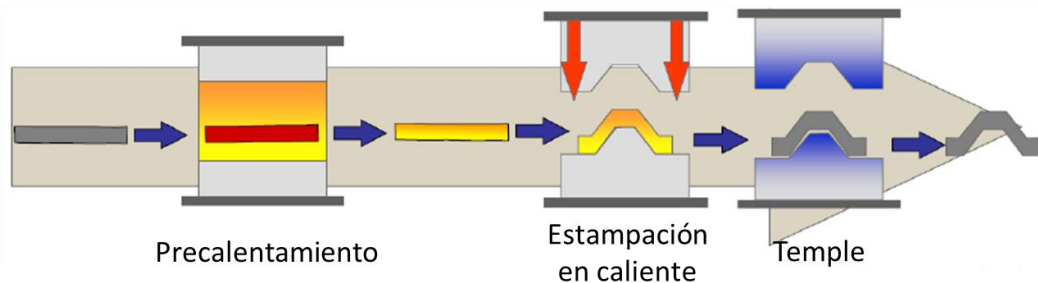


Ilustración 1. Piezas de estampación en frío

En cambio, los procesos de estampación en caliente, son métodos más complejos en los que se requiere calentar previamente la chapa para aumentar su maleabilidad y conseguir la geometría deseada con mayor facilidad, cuyas operaciones más críticas son el calentamiento, la estampación y el templado de la pieza, que precisan de mayor control para el conformado de la propia chapa. Dentro de estos procesos de estampación en caliente existen dos métodos de fabricación diferentes, el método directo y el indirecto (véase Ilustración 2).

- **Método directo:** El material a conformar es calentado hasta su temperatura de austenización en un horno durante un periodo de tiempo determinado por dicho material. Posteriormente, es transportado al troquel en el que será deformado antes de que pierda temperatura y en este punto se produce la estampación con una presión concreta. Una vez se le ha dado la forma a la chapa, esta es refrigerada para la obtención de grandes propiedades mecánicas gracias al templado de la pieza.
- **Método indirecto:** La gran diferencia de este método respecto al anterior, es que en el indirecto se le da una preforma a la chapa mediante estampación en frío antes de meterla al horno para que alcance su temperatura de austenización. La principal razón de este paso adicional es el aumento de la capacidad de deformación en las zonas previamente deformadas, consiguiendo así piezas extremadamente complejas [5].

#### Método directo



#### Método indirecto

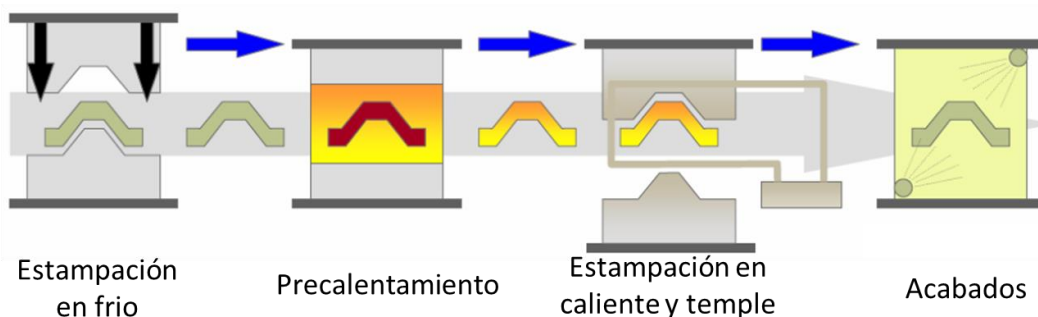


Ilustración 2. Método directo e indirecto de la estampación en caliente

Si bien es cierto que la problemática es distinta para para cada sector, se ha de tener en consideración que todos ellos buscan mejoras en la eficiencia de los procesos, reducción de costes de fabricación y en incrementar la productividad. Esta demanda es la responsable del desarrollo de estas técnicas de fabricación, como anteriormente se ha mencionado en el sector de la automoción, por ejemplo, este desarrollo ha sido

generado por la necesidad de la reducción de peso del propio vehículo, manteniendo la seguridad de la estructura y su resistencia frente a los choques (véase Ilustración 3). El desgaste que sufren los troqueles es totalmente diferente si se comparan los procesos de estampación en caliente para la fabricación de componentes de vehículos con los procesos de estampación en frío.



*Ilustración 3. Estructura de automóvil*

Dependiendo de las exigencias de los procesos de fabricación, todas las herramientas utilizadas para dichos procesos sufrirán un desgaste, esto, decidirá en gran medida el aumento o decrecimiento del ciclo de vida de estos útiles. Existen herramientas las cuales pueden ser sustituidas fácilmente por otras después de haberse desgastado, otras, sin embargo, son herramientas de alto valor añadido y la reparación de este utillaje supondría minimizar los costes de la producción, aprovechando mejor así la vida de estas herramientas, como es el caso de los troqueles de los procesos de estampación.

En lo que respecta a este estudio, los procesos de estampación en caliente son, sin duda, uno de los procesos donde el troquel de estampación más sufre el desgaste. Por otro lado, el desarrollo de estas técnicas de fabricación, exige útiles de mayor complejidad para el correcto funcionamiento de estos procesos de estampación. De esta manera, son capaces de lograr aceros de ultra alta resistencia en componentes con menor peso.

Como anteriormente se ha mencionado, el troquel recibe una chapa a altas temperaturas y realiza la estampación, y durante todo el proceso el troquel está siendo refrigerado internamente para ayudar también en el temple del material. Con el fin de alcanzar las especificaciones para las piezas a fabricar, las partes activas de los troqueles están sometidos a un gran desgaste, no solo por la presión y el rozamiento que sufren a la hora de ser conformados, sino que también por la abrasión a altas temperaturas debidas al proceso.

## 5.2. Tecnologías láser

El láser, *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 [6].

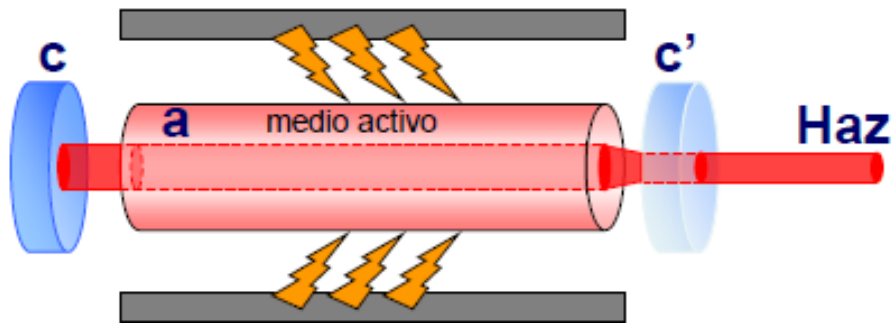


Ilustración 4. Generación láser

Desde sus inicios, las propiedades del láser eran conocidas y las posibles aplicaciones del mismo eran notorias, pero su implantación en procesos reales ha sido más lenta de lo esperado, pero constante.

En bastantes casos, las aplicaciones de los láseres se previeron antes de crear dichos láseres para llevar a cabo las mismas aplicaciones. Por dar ejemplo, su empleo en las telecomunicaciones fue vaticinado a finales de la década de los cincuenta y, en la actualidad, una de las aplicaciones fundamentales de los láseres son las auguradas telecomunicaciones, basadas en señales transmitidas por fibra óptica.

Hoy en día, este sistema está implantado 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.

### 5.2.1. Características del láser

En estas características reside el porqué de que un haz láser sea posible enfocarlo en una zona tan reducida o que sea capaz de propagarse a largas distancias.

#### ❖ Coherencia

Una luz es coherente cuando la luz se enfoca en un punto a una distancia focal determinada que depende de la longitud de onda con la que llegue la luz desde la lente. Además, dicha luz debe mantener la relación monocromática para poder enfocarse en dicho punto focal  $f$ , son necesarias ambas condiciones para la coherencia espacial y temporal de la luz.

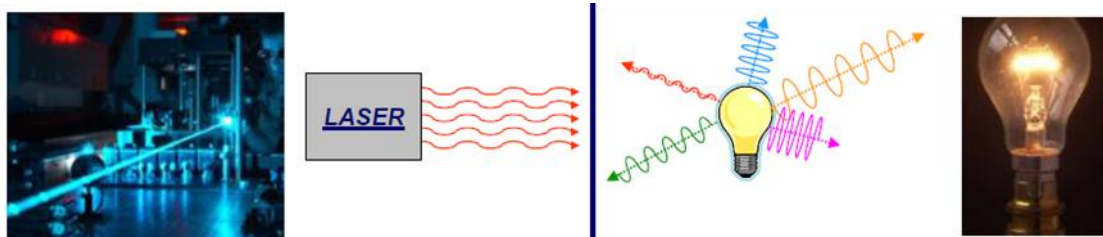


Ilustración 5. Haz láser y luz blanca



### ❖ Monocromático

Una luz se considera monocromática cuando se encuentra en una única longitud de onda de las zonas de radiación electromagnética (véase Ilustración 6). La luz blanca, por ejemplo, contiene múltiples longitudes de onda, pero el láser, sin embargo, tiene una única longitud de onda y por ello se le considera monocromática, lo que le permite enfocar el haz en un punto muy pequeño, pero ninguna fuente de luz consigue ser monocromática en su totalidad.

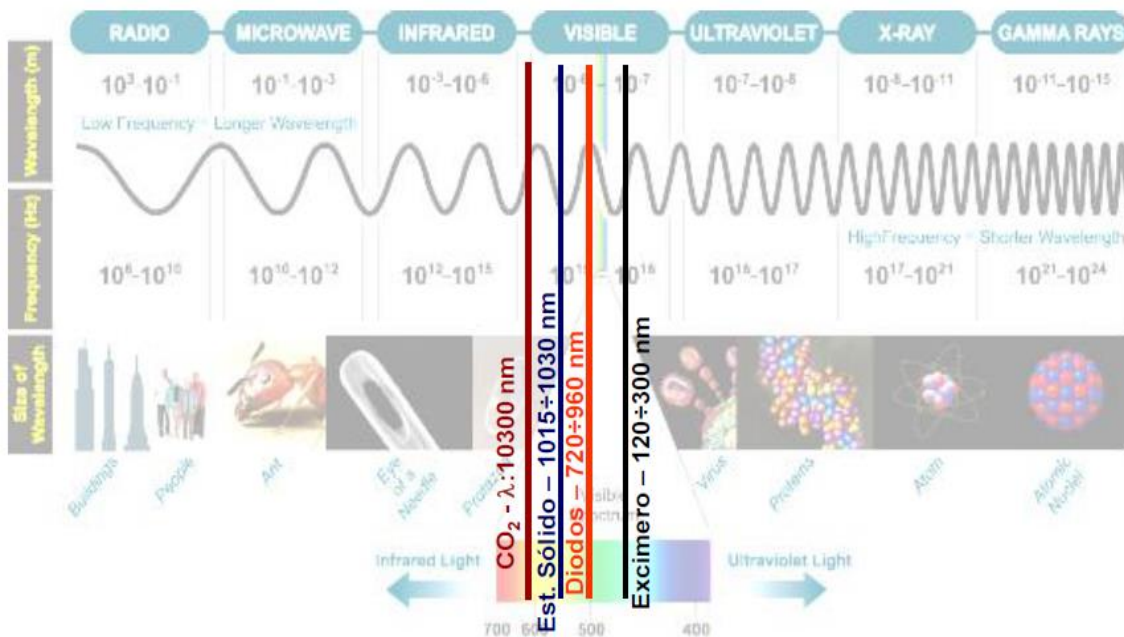


Ilustración 6. Láseres de distinta zona electromagnética

### ❖ Direccionalidad

Siguiendo con el ejemplo del haz láser y la luz blanca se puede entender perfectamente la importancia de la direccionalidad de la luz. En la luz de la bombilla, la luz se dispersa en muchas direcciones, mientras que en el láser los haces de luz llegan paralelos a la lente, gracias al resonador, y con ángulo de incidencia alfa el punto se enfoca bien.

De esta forma, se consigue así una fuente de calor selectiva, es decir, se logra concentrar una gran cantidad de energía en donde se enfocó el haz sin afectar a las zonas próximas (véase Ilustración 7).

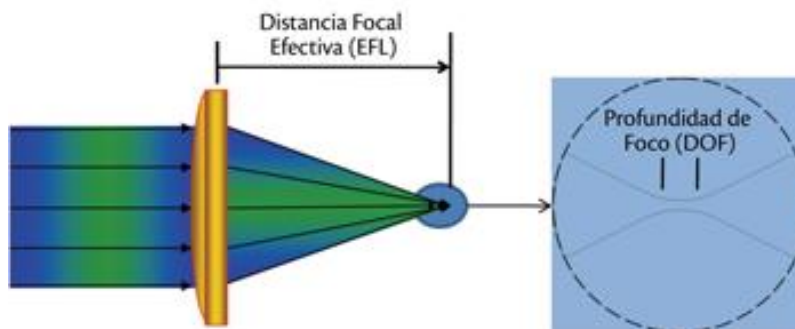


Ilustración 7. Distancia focal efectiva del haz láser

### 5.2.2. Funcionamiento del láser

La cavidad óptica está diseñada para que la luz sea capaz de circular y consta de dos espejos con distinta reflectancia, uno que lo refleja en su totalidad y el otro lo refleja parcialmente, este conjunto se 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, el cual puede ser líquido, gas o sólido, y dependiendo del medio se excita de una forma diferente.

Para lograr la amplificación es indispensable una inyección de energía, esta se consigue a partir del bombeo que puede ser tanto de una corriente eléctrica como de un haz de luz. Para aprovechar eficientemente estos sistemas en diferentes procesos, es necesario conocer bien el funcionamiento y los componentes que lo forman, los cuales vienen detallados a continuación (véase Ilustración 8).

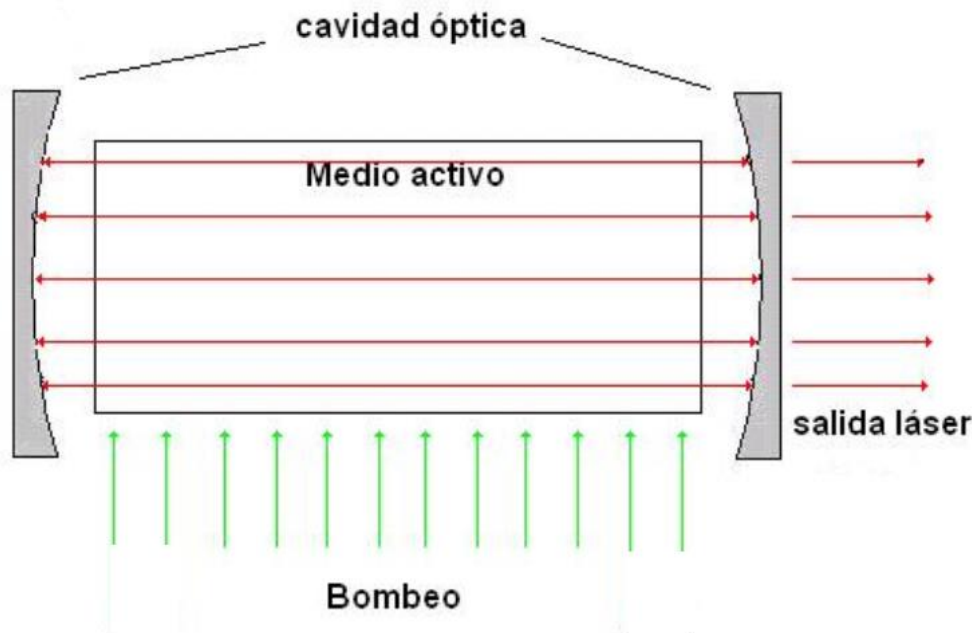


Ilustración 8. Elementos del sistema láser

#### ❖ Cavidad óptica

La función principal es que la luz que se pueda producir de manera espontánea en el propio medio y cuya dirección sea paralela al eje de la cavidad óptica, sea amplificada a cada vuelta que dé, tratando de mantener la luz en circulación con el medio activo el mayor número de veces posible.

Este sistema posee dos espejos dieléctricos, con alta reflectividad, responsables de que la luz rebote. Uno de los espejos, contiene casi el 100% de reflectividad, mientras que el del otro es menor. Una pequeña porción de la potencia interna de la cavidad óptica, saldrá a través del acoplador de la salida (el espejo de menor reflectancia) en forma de un haz de luz con las propiedades de monocromía, coherencia y direccionalidad anteriormente mencionadas.



### ❖ Medio activo

Este lugar se encuentra entre los espejos de la cavidad óptica y en ella se produce la excitación y por lo tanto la amplificación del haz de luz. Dependiendo del tipo de material que componga el medio, se emitirá una longitud de onda diferente, o incluso, la excitación se realizará de forma diferente.

Si el sistema tuviese más pérdidas que la ganancia obtenida, el medio solamente emitiría algo de luminiscencia. Si se rebasase este umbral en cambio, la ganancia sería superior a las pérdidas y entonces el sistema empezaría a oscilar.

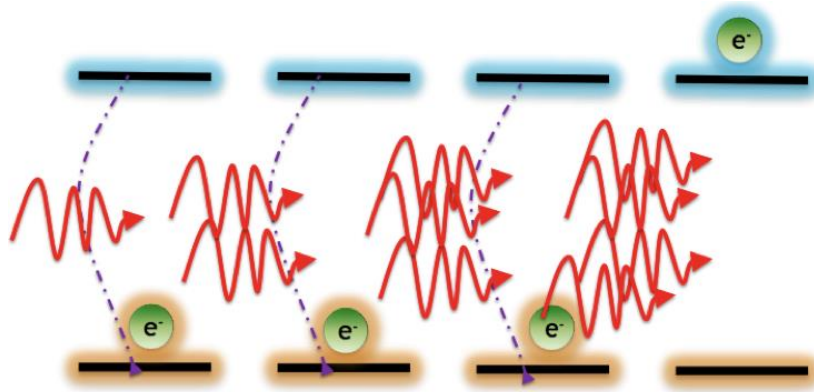


Ilustración 9. Medio activo

### ❖ Bombeo

La función principal del bombeo es la excitación del haz en el medio activo, con el fin de que se produzca una amplificación de radiación. Normalmente, se utilizan como métodos de bombeo, el bombeo óptico o el bombeo eléctrico.

El bombeo eléctrico es utilizado en sistemas láser con medios activos semiconductores y de gas. Por el contrario, el bombeo óptico es aplicado en sistemas láser con medios activos en estado sólido o de colorante (véase Ilustración 10).

Ya que existen pérdidas inevitables en el proceso de generación del haz láser, la potencia de bombeo emitida para esta generación es siempre mayor a la potencia de emisión del haz láser generado.

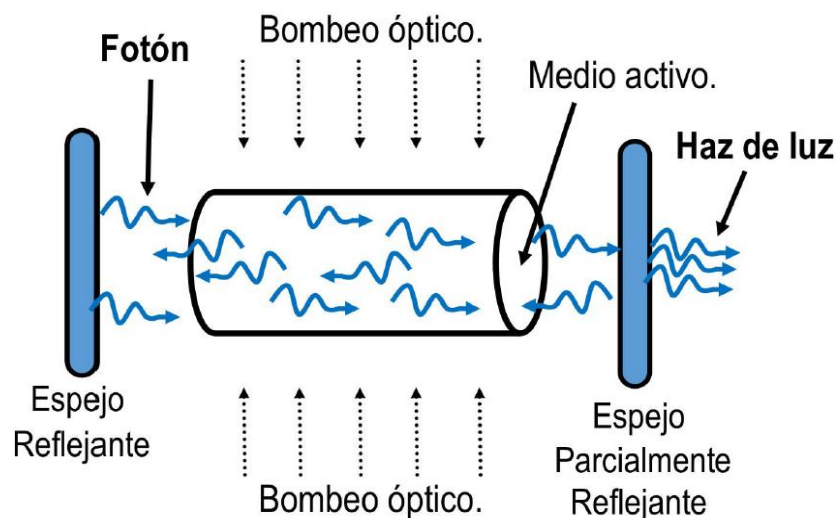


Ilustración 10. Bombeo óptico del sistema láser

### 5.2.3. Aplicaciones del láser en el sector industrial

A pesar de la lenta introducción del láser en la industria desde su creación, el rápido desarrollo de las mismas ha hecho posible la gran aceptación que tienen sus aplicaciones en la actualidad. Estos sistemas han ido sustituyendo otras aplicaciones más tradicionales, que, a día de hoy, tienen menor productividad. Esta productividad se ha dado en gran medida gracias a la capacidad de automatizar estos procesos, aumentando la velocidad de producción, además de la versatilidad que aporta este tipo de procesos.

Aun así, el gran problema a batir por estas tecnologías es su tremendo coste, el cual requiere una potente inversión por parte de las empresas para poder implementarlas. Pero, gracias al continuo desarrollo de estos sistemas, es posible conseguir cada vez sistemas láser en la industria más económicos y eficientes como los láseres de fibra. Gracias a que las ventajas del uso de esta tecnología superan a las razones económicas se sigue investigando en este tipo de procesos y llegará el día en el que estos procesos sean económicamente competitivos con los métodos convencionales.

En la próxima tabla se pueden observar distintos métodos de fabricación de estas tecnologías [7].

Tabla 1. Tecnologías láser en la industria

Ámbito de fabricación	Proceso	Método láser
Procesamiento y transformación de materiales	Fabricación aditiva	<i>Selective Laser Melting</i>
		<i>Laser Metal Deposition</i>
		Recargue
	Soldadura	Soldadura láser por conducción
		Soldadura por <i>keyhole</i>
		Soldadura de materiales disimilares
	Corte	Corte convencional con gas
		Corte remoto
	Tratamiento térmico superficial	Temple
		Revenido
	Texturizado	Texturizado superficial
	Marcado	
	Micro-taladrado	<i>Single pulse drilling</i>
<i>Percussion drilling</i>		
<i>Trepanning</i>		
Inspección	Ensayos no destructivos	Termografía activa con láser
		Ultrasonidos láser/vibrometría
Metrología		Triangulación láser-posicionamiento

En las próximas páginas se hará mención a algunas de las metodologías de la anterior tabla, con una breve descripción de las mismas. Y en el siguiente punto, se explicará con mayor detalle los procesos aditivos de LMD, el cual, es objeto de estudio de este proyecto y las metodologías que más comparten con este tipo de procesos.

### ❖ Corte por láser

Esta tecnología se limita a dividir una pieza, normalmente una chapa metálica (aunque puedan ser otros tipos de materiales), en varios elementos mediante pura energía fundiendo habitualmente la superficie del material. Existen varios tipos de corte por láser, pero el más generalizado en la industria es el corte por fusión del material. Estos cortes evacuan el material cortado por el surco realizado en el material fundido (véase Ilustración 11). Para forzar esta evacuación se utiliza un gas a presión denominado gas de asistencia.

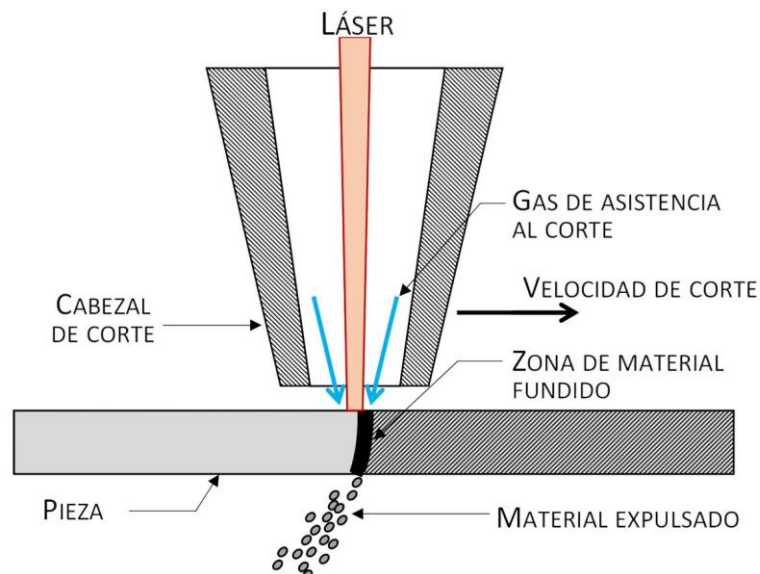


Ilustración 11. Esquema de corte por láser

Los procesos de corte deben programarse correctamente para conseguir eficiencia en el corte. Es muy importante el control sobre la densidad de potencia del láser, el diámetro del *spot* del láser, la velocidad de avance y la presión del gas.

El corte por láser aumenta mucho la temperatura en la zona que rodea el surco y esta es térmicamente alterada. Esto supone un problema, ya que, la estructura puede sufrir una modificación y producir estrías en las paredes laterales [8].



Ilustración 12. Corte por láser

### ❖ Texturizado y marcado láser

El *engraving* o texturizado láser realiza acabados superficiales a materiales usando únicamente energía láser, con el fin de obtener unas mejoras de las características que antes no tenía y mejorar las propiedades de la pieza [9]. En estos procesos, se utiliza un láser pulsado, con el principal objetivo de conseguir una anchura y profundidad adecuada de las ranuras (véase Ilustración 13), por ejemplo, para realizar uniones disimilares con termoplástico.



Ilustración 13. Texturizado láser para moldes

Dejando a un lado el texturizado o *engraving*, existe otro proceso para el acabado superficial sin tanta repercusión en la superficie y que su finalidad no es puramente mecánica, el marcado láser. El grabado o marcado láser, graba la superficie de un material mediante el haz láser con el fin de dejar una marca sobre él, ya sea una figura decorativa o simple escritura. Los procesos de marcado son muy comunes en la industria para evitar que los números de serie se borren o desgasten con el uso de la pieza (véase Ilustración 14).



Ilustración 14. Engranaje marcado



### ❖ Pulido láser

Existen otras formas de realizar mejoras sobre la superficie de una pieza mediante láser dejando a un lado el texturizado, esta metodología llamada pulido por láser reduce la rugosidad superficial para lograr un mejor acabado en la pieza (véase Ilustración 15). Con el fin de intentar sustituir el pulido manual, este tipo de metodologías están consiguiendo implantarse en la industria.

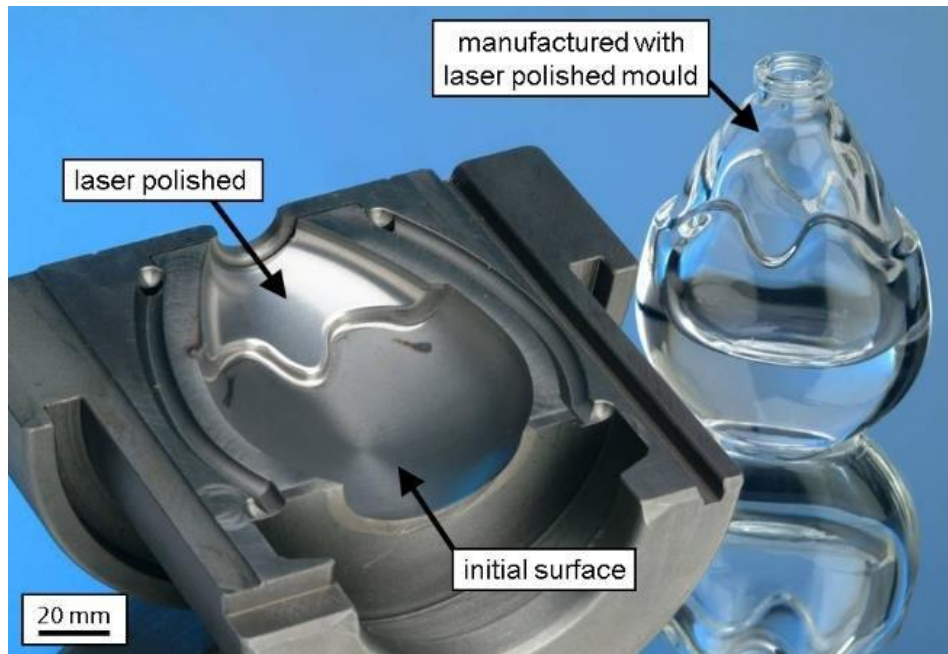


Ilustración 15. Molde pulido por láser

Estas tecnologías se basan en la fundición de picos de la rugosidad del propio material. La radiación del láser pasa por encima de estos picos fundiéndolos, de tal forma que este material fundido penetra en los valles de la rugosidad (véase Ilustración 16).

Una vez realizado el pulido, la zona más cercana a dicho pulido queda afectada térmicamente debido al calor soportado durante la fundición de los picos. Esta zona sufre un cambio en su estructura metalúrgica, pudiendo modificar la dureza y las tensiones residuales en el material [10].

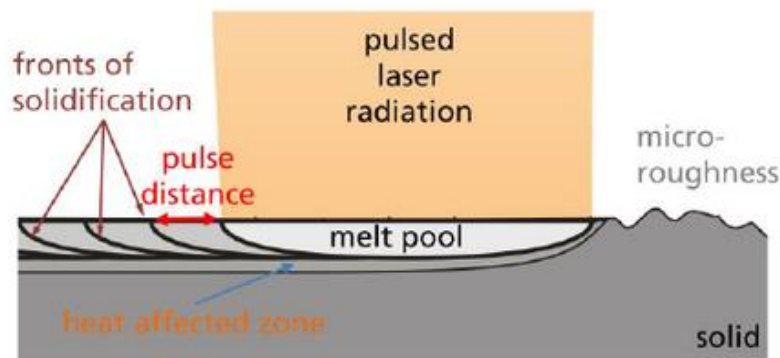


Ilustración 16. Esquema de pulido láser

### ❖ Soldadura láser

Esta tecnología láser puede ser la más investigada y desarrollada hasta el momento, este tipo de soldadura es, entre los procesos de soldadura, el más preciso que se utiliza en la industria en estos momentos. Gracias a la metodología láser, esta soldadura es capaz de calentar una zona más localizada y afectar térmicamente en menor grado los alrededores de la zona de unión. La soldadura láser se utiliza para la reparación de utillaje industrial y la fusión por soldadura de elementos de diversos materiales, evitando así la deformación que se genera con otros métodos debido a la influencia térmica creada durante el proceso.

La mayor ventaja de este método es su capacidad de concentrar el calor necesario para la fusión en una zona muy reducida, por lo que la zona térmicamente afectada disminuye. Otras de las ventajas que se pueden enumerar en esta tecnología son la reducción de peso de la unión, la posibilidad de automatizar el proceso aumentando la productividad, poder reducir las tensiones internas y lograr mejores resultados en el acabado de la unión.



*Ilustración 17. Soldadura láser*

En estos procesos el láser funde la zona donde se hará unión, por lo que no se necesitará un aporte de material externo para la soldadura de las partes (véase Ilustración 17). Esta situación es posible gracias a que el láser se puede enfocar a una zona muy reducida y calentar únicamente el material deseado. Los procesos de soldadura láser más utilizados hoy en día son los de CO<sub>2</sub>, diodo, híbrido y láser de fibra.

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. Ese tipo de soldaduras se ha implementado en numerosos sectores, como pueden ser en el sector de la automoción, en el aeronáutico, en energías renovables o en la fabricación de tubos para sectores de petróleo o gas.

Las mayores desventajas de esta tecnología son su alto coste inicial y el coste del mismo proceso, lo cual supone una gran inversión implantar estas metodologías en las empresas [11].

### 5.3. Aporte por láser o *Laser Metal Deposition (LMD)*

Los métodos de mecanizado tradicionales basan su proceso en el arranque de viruta, a partir de una pieza de material en bruto, hasta lograr la geometría deseada. Sin embargo, existen tecnologías capaces de realizar el proceso inverso, fabricar piezas añadiendo material sobre un sustrato base. Dichas técnicas, son comúnmente conocidas como tecnología de fabricación aditiva, en contraposición a las anteriormente mencionadas sustractivas o de arranque de viruta. El uso de la fabricación aditiva está en auge estos últimos años, es por ello que se ha convertido en una de las más importantes tecnologías emergentes. Las capacidades de esta tecnología no solo se limitan a la generación de geometrías complejas, sino que, también pueden realizar reparaciones en elementos creados por distintos métodos de fabricación. Además, estos procesos de LMD son capaces de trabajar con una gran variedad de materiales, incluyendo los materiales difíciles de mecanizar mediante los métodos tradicionales como puedan ser el titanio o las aleaciones de Inconel. Pese a su versatilidad y flexibilidad, este método de fabricación no puede conseguir los acabados superficiales alcanzados mediante el mecanizado todavía y que pueden ser necesarias para la funcionalidad de las piezas (véase Ilustración 18).

En el presente estudio, se centra en la tecnología LMD (*Laser Metal Deposition*) de entre todas las tecnologías de fabricación aditiva disponibles. Este tipo de procesos se emplean habitualmente en la industria para reparar piezas de alto valor añadido y, por lo tanto, su desarrollo y evolución suscita gran interés. Para saber más sobre esta tecnología de fabricación, es necesario conocer sus antecedentes y similares.



Ilustración 18. *Laser Metal Deposition*

Estos procesos de LMD guardan gran semejanza con los procesos de soldadura láser o *Laser Welding*, la cual es una tecnología sencilla para el sellado y unión de materiales de fino espesor. Además, estos procesos son capaces de soldar superficies con una mínima afectación térmica pudiendo soldar espesores muy finos sin deformación de sus componentes, realizan soldaduras rápidas y no se precisa de la habilidad de un soldador de TIG. Hay que tener en cuenta, que en estos 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 dotada por el láser, y esto puede significar una limitación para el proceso.

En la fabricación aditiva existen dos grandes ramas, en lo que a procesos de fabricación se refiere. La primera es el SLM (*Selective Laser Melting*) el cual contiene dos etapas en su proceso, deposición y fusión. Mientras que la segunda, el aporte por láser o LMD consta de una única etapa, realizando ambos procesos de una misma vez para la fabricación de la pieza [12].

*Selective Laser Melting* o fusión selectiva con láser es una tecnología aditiva, la cual en su primera etapa deposita, sobre una superficie horizontal, una fina capa de polvo y en la segunda funde con el láser las superficies donde se quiere aportar. Acto seguido, la superficie horizontal donde se ha aportado desciende, y se deposita sobre ella otra fina capa de polvo para proseguir con la fabricación, capa a capa repitiendo el proceso, de la pieza que se desea realizar (véase Ilustración 19). Este es un proceso, con un rápido desarrollo, que se está implementando tanto en la investigación como en la industria.

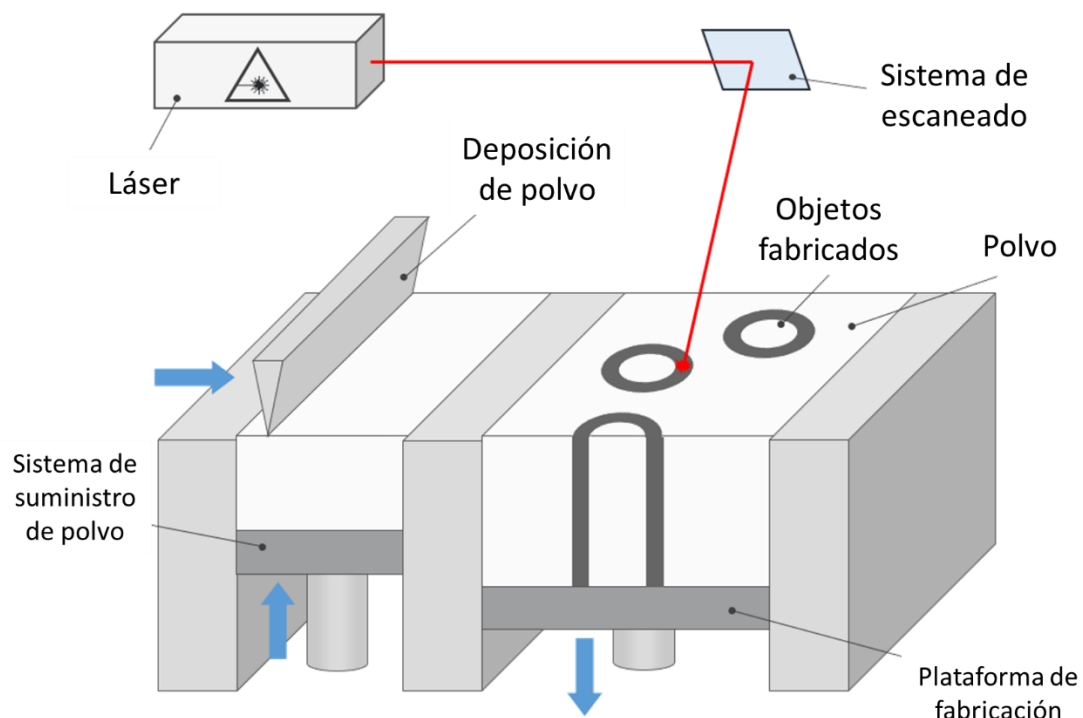


Ilustración 19. *Selective Laser Melting*

El SLM tiene como inconveniente la operativa en dos pasos, que ralentiza los procesos de fabricación, y su incapacidad de realizar procesos en superficies no horizontales, limitando su capacidad de generación de geometrías complejas. Estas desventajas, son completamente superadas con los procesos de LMD, de una única etapa y con capacidad de trabajar en cinco ejes.

Los procesos de aporte por láser o *Laser Metal Deposition* son procesos de fabricación aditiva en los cuales se añade material y se fusiona junto con la superficie fundida del sustrato gracias al haz láser de gran intensidad. En dichos procesos aditivos, el material se aporta capa a capa hasta lograr la geometría deseada. En el LMD es posible la fabricación con una amplia gama de materiales y este material a aportar se puede alimentar de varias maneras, como por ejemplo el aporte por hilo "*Wire Feeding*" o el aporte por inyección de polvo "*Laser Cladding by powder injection*" que es el proceso de fabricación que se utilizará durante esta investigación.



En este proceso para la fabricación de la pieza, se utilizan dos flujos de gases totalmente independientes. El primero de ellos, denominado gas de arrastre, es el responsable de alimentar la zona del aporte con polvo metálico el cual arrastra mediante la corriente de gas, dicha zona es calentada por el haz láser hasta lograr el baño fundido para el aporte del material. El segundo flujo de gas, llamado gas de protección, genera una campana protectora alrededor de la zona aportada, evitando así que ningún elemento extraño penetre en el aporte y reaccione, dejando un defecto en la estructura del material. Estos gases citados tienen también la función de proteger las lentes del láser, evitando que cualquier partícula extraña obstaculice el haz láser. Dichos gases suelen ser gases inertes, tales como el nitrógeno, argón o helio, para evitar que cualquier reacción u oxidación pueda generarse [13].

Estos sistemas de producción son capaces de trabajar con gran variedad de aleaciones metálicas en polvo, aleaciones los cuales podrían ser difíciles de mecanizar con los métodos tradicionales. Con estos procesos, es posible y relativamente fácil incluso, generar capas de diferentes materiales para optimizar las propiedades de la pieza o realizar un cambio de composición gradual de los materiales aportados. Aparte de las anteriormente mencionadas, la tecnología de *Laser Metal Deposition* cuenta con más ventajas, como podría ser el recorte de los tiempos de producción, puesto que en ciertas ocasiones reducen los tiempos de mecanizado, o simplifican la fabricación de las piezas. A su vez, presenta una gran oportunidad para la realización de piezas imposibles de fabricar por métodos convencionales de arranque de viruta, piezas cuya geometría es excesivamente compleja para los métodos tradicionales.

Las tecnologías LMD son cada vez más comunes en la industria, especialmente integradas en los sectores de máquina herramienta, energías renovables, automoción e industria aeroespacial. Por ejemplo, en la industria aeronáutica existen piezas con excepcionales requerimientos como las turbinas de los aviones, los cuales, en la zona del compresor se utiliza titanio dada su ligereza y tras la cámara de combustión, en la turbina, aleaciones con base níquel como la aleación termorresistente Inconel 718, por su gran capacidad de conservar las propiedades mecánicas en altas temperaturas, además de no expandirse (véase Ilustración 20). Estos materiales son realmente difíciles de manipular mediante los métodos de mecanizado habituales y por ello la tecnología aditiva está logrando abrirse paso en este sector.



Ilustración 20. Blisk de Inconel 718

O por otra parte como en el sector de la automoción, donde se requiere el uso de esta tecnología para la reparación o realización de recubrimientos de herramientas de alto valor añadido (véase Ilustración 21). Esto se debe mayormente, al rápido desarrollo de esta industria y sus necesidades cada vez más exigentes y complejas, como por ejemplo los requerimientos del utillaje de los procesos de estampación en caliente, que es el caso que ocupa a este mismo estudio.



*Ilustración 21. Troquel de estampación en caliente*

Las mayores desventajas de la tecnología LMD, pueden enmarcarse en el aspecto económico, puesto que para la realización del proceso es indispensable usar gases cuyo coste es muy elevado. Este requisito es inherente al proceso, puesto que para la fabricación se requieren gases no inflamables e inertes, gases que normalmente son gases nobles, los cuales dada su escasez suelen tener un valor muy elevado [14].

Otra limitación de los procesos de aporte por láser es su incapacidad de lograr acabados excepcionales, por lo cual son necesarios los procesos híbridos. Es decir, tras haber finalizado la pieza mediante LMD se realiza un mecanizado para lograr la superficie y acabado que requiere la pieza.

A pesar de tales inconvenientes, la tecnología LMD continúa extendiendo sus horizontes en la industria, dado que las ventajas del empleo del LMD superan con creces a las razones económicas. Tanto es así que, empresas fabricantes de maquinaria de aporte por láser, como por ejemplo YAMAZAKI MAZAK CORPORATION, DMG MORI o TRUMPF, ya disponen de equipos en sus catálogos que son capaces de utilizar mezclas de distintos gases inertes, aumentando más incluso el coste de la fabricación. La tendencia de estas empresas se debe a los requerimientos del diseño de la boquilla de los centros de procesamiento láser y surgen en base a problemas generados por dinámica de fluidos.

### 5.3.1. Procesos de LMD en troqueles de estampación en caliente

Como anteriormente se ha mencionado, el rápido desarrollo de los procesos de estampación en caliente ha requerido de nuevas tecnologías que puedan ofrecer ventajas para la fabricación y reparación de sus troqueles. Este es el caso del LMD, el cual, gracias a su gran versatilidad y flexibilidad puede ser muy ventajoso para la ejecución de la geometría de los troqueles y la posibilidad de poder realizar este proceso en cualquier entorno. Sin embargo, a pesar de todas las posibilidades que ofrece, esta tecnología requiere de más investigación todavía para el perfeccionamiento de estos procesos en la estampación.

Los troqueles de la estampación en caliente, sufren de desgaste por abrasión a altas temperaturas y de aparición de grietas por los ciclos térmicos que soporta, como ya se ha explicado anteriormente. Dichos defectos, se restauran con el aporte de material mediante soldadura, ya que esto supone menor inversión que un nuevo troquel. Pero esta soldadura es poco conveniente, porque, producen grandes cantidades de calor en una región poco focalizada, afectando térmicamente así a las propiedades de la pieza. Del mismo modo, la exactitud de la reparación y la mínima influencia de la misma sobre las propiedades de la pieza dependen en gran medida a la experiencia y pericia del operario.

Con el fin de acabar con las desventajas nombradas en el párrafo anterior, los procesos de LMD han emergido en el sector de la automoción para agilizar los procesos de producción y aumentando el ciclo de vida de los troqueles. El aporte por láser automatiza los procesos de reparación, asegurando la precisión que requieren estas herramientas de alto valor añadido. La tecnología LMD es capaz de focalizar el calor generado para no dañar térmicamente las propiedades de la pieza.

Los procesos de aporte por láser, gracias a su capacidad de trabajar en cinco ejes, pueden realizar geometrías que los métodos tradicionales de arranque de viruta no pueden lograr. Un ejemplo claro para esta situación son los conductos de enfriamiento que contienen los troqueles, donde la maquinaria de los procesos de aporte por láser se puede adaptar a cualquier geometría, pero un centro de mecanización no podría alcanzar o adaptarse para trabajar.

Por otra parte, hay que mencionar que los acabados logrados por LMD no contienen el acabado superficial que requieren los troqueles y por lo tanto será necesaria la intervención de los procesos de mecanizado para la obtención de los acabados deseados para la estampación. Es decir, la reparación o fabricación de los troqueles requerirá de un proceso híbrido para su correcta ejecución.

### 5.3.2. Recubrimientos con tecnologías láser

Los láseres proporcionan una oportunidad única para la realización de superficies de alto rendimiento. Con el desarrollo de los láseres de alta potencia de salida, las tecnologías de modificación de superficie están creciendo rápidamente, sobre todo en la identificación de nuevos y mejores métodos de procesamiento. Muchos fallos relacionados con la superficie por mecanismos que implican corrosión, desgaste, erosión y oxidación en altas temperaturas, pueden verse reducidas al mínimo mediante técnicas de recubrimientos con tecnologías láser, como, por ejemplo, la deposición química asistida por láser, los procesos de aporte por láser y los tratamientos superficiales con láser.

Estos procesos, permiten adaptar las propiedades superficiales de una estructura a las necesidades de la superficie de la aplicación sin tener que sacrificar las características de volumen de dicha estructura. La ventaja adicional de estos procesos, es que se pueden conservar los materiales estratégicos, que suelen ser caros o escasos. Dependiendo de la elección de los materiales de la aleación en la superficie diseñada, un material base menos costoso, como el acero AISI 1020, puede modificarse en una zona localizada para aumentar la resistencia a la erosión, el desgaste, la corrosión y la oxidación a alta temperatura; tan sólo las superficies localmente modificadas poseerán las propiedades características de los recubrimientos de alto rendimiento. Además, las tasas de calentamiento y enfriamiento inherentemente rápidas asociadas a la técnica de modificación de la superficie con láser, son capaces de producir fases de no equilibrio y metaestables, ofreciendo así la posibilidad de obtener nuevos materiales con propiedades novedosas.

El uso de un láser de alta potencia como fuente de calor para los procesos de aporte por láser produce una ventaja adicional. Dado que la entrada de calor del rayo láser se localiza en las zonas a procesar, se reduce sustancialmente la influencia térmica que pueda tener sobre las propiedades de la pieza. Además, hay que tener en cuenta que la dilución del material aportado en el sustrato se mantiene al mínimo, para no influir en las propiedades del mismo sustrato, pero consiguiendo una penetración significativa para que el aporte no se separe de la pieza. Esta tecnología LMD puede proporcionar propiedades de superficie a medida [15].

Como proceso de revestimiento, presenta muchas ventajas sobre los métodos alternativos como la soldadura por arco o plasma. Estas ventajas incluyen la reducción de la dilución, la reducción de la porosidad en el material aportado, la reducción de los defectos debido a la influencia térmica, en el que el sustrato absorbe muy poca energía en una zona muy focalizada en comparación con los otros dos métodos y la reducción de los costes del posterior mecanizado al revestimiento, porque el material aportado puede colocarse con mayor precisión. Esto último se debe a que la microestructura se solidifica rápidamente, el acabado superficial es relativamente liso, el método de aplicación es sin contacto, que puede automatizarse fácilmente y el proceso es omnidireccional.

Además de el gran control que proporciona el láser, le da al procesamiento láser el potencial de sintetizar materiales en desequilibrio en forma casi de red. De hecho, ese objetivo se ha alcanzado recientemente y la prueba del concepto ya está disponible en procesos como el acristalamiento láser [16].

### 5.4. Functionally Graded Materials (FGM)

Hasta hace algunos años, las acumulaciones de volumen se realizaban principalmente con un solo material. Sin embargo, las condiciones de trabajo pueden variar mucho y, por lo tanto, el uso de más de un material en un componente produciría grandes beneficios. Gracias a ello, empezaron a desarrollarse, mediante acumulaciones de múltiples materiales, aleaciones con excelentes propiedades metalúrgicas, las cuales, se podrían utilizar en zonas específicas de la pieza que soportan distintos entornos de trabajo, mientras que la pieza restante se podría fabricar con composiciones más baratas. La selección de los materiales combinados depende en gran medida de las propiedades termofísicas y mecánicas solicitadas [17].

Los materiales con gradiente funcional (FGM) son materiales de alto rendimiento con propiedades mejoradas que les permiten soportar un entorno de trabajo severo que los materiales compuestos tradicionales no pueden soportar. El gran avance de estos materiales se debe al cambio gradual de sus propiedades internas a lo largo del elemento gracias al paulatino cambio de composición. El término "*Functionally Graded Material*" es ahora ampliamente utilizado por la comunidad de materiales, para materiales que exhiben propiedades y microestructuras espacialmente no homogéneas.

Los materiales con gradiente funcional no son algo nuevo en sí mismos, este tipo de materiales son muy comunes en la naturaleza en huesos, dientes, etc. La naturaleza diseñó estos materiales para cumplir con los requisitos de servicio esperados, pero lo que resulta emocionante es la constatación de que los gradientes pueden diseñarse a nivel microestructural para adaptar el rendimiento funcional de materiales específicos a aplicaciones concretas.

Los materiales de gradiente funcional se producen con el fin de eliminar los cambios bruscos en las propiedades que existen en los materiales compuestos tradicionales, donde se inicia habitualmente el fallo. Estos agudos cambios de propiedades son reemplazados por un cambio gradual de composición que produce una transición suave de las propiedades de un material a otro (véase Ilustración 22). Una de las características únicas de los *Functionally Graded Materials* es su capacidad de ser adaptados para una aplicación específica.

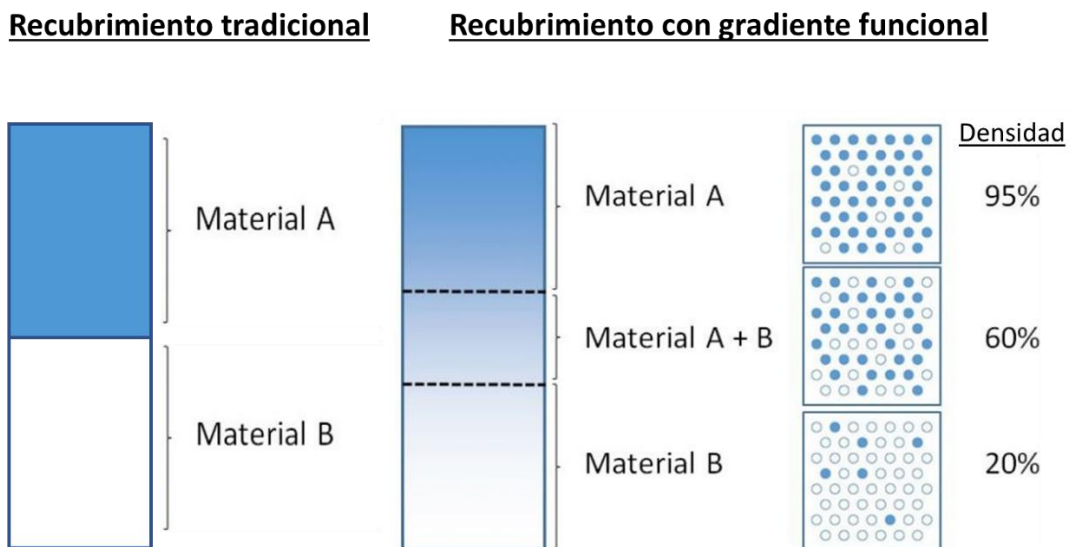


Ilustración 22. Esquemas de recubrimientos convencionales y FGM

En general, el rendimiento de un recubrimiento depende en muchas variantes, como la de la fuerza de adhesión entre el recubrimiento y el material del sustrato. Por consiguiente, es esencial asegurar la fuerza de adherencia de un recubrimiento para garantizar que cumple con la funcionalidad para la que fue diseñado el material. La resistencia real entre el recubrimiento y el sustrato está regida por una serie de variables tales como, el posible flujo plástico entre materiales diferentes, el desajuste elástico entre los dos, los defectos introducidos en el recubrimiento, las tensiones residuales, defectos en el sustrato y cerca de la interfaz. En realidad, ya es difícil encontrar una definición generalmente aceptada de la adhesión entre el revestimiento y el sustrato que tenga en cuenta la complejidad de los efectos de la microestructura, la carga externa y el medio ambiente. Existen varios métodos para determinar la fuerza de adhesión interfacial de los recubrimientos, como la prueba de tracción directa, las pruebas de rayado e indentación, la prueba de flexión, la prueba de cavitación, la prueba de impacto y la prueba de dureza de Rockwell [18].

Las aplicaciones de los FGM han sido integradas en varias industrias diferentes entre las que se incluyen la industria militar, médica, deportiva o de la automoción, o incluso en los sectores energético y aeroespacial. Para la realización de este tipo de compuestos, se utilizan varios procesos de fabricación diferentes, entre los que se encuentran la pulverización por plasma, deposición química de vapor, pulvimetalurgia o metalurgia de polvos, método de colada centrífuga, síntesis autopropagada a alta temperatura o el proceso de estudio en este trabajo el proceso de aporte por láser, por ejemplo.

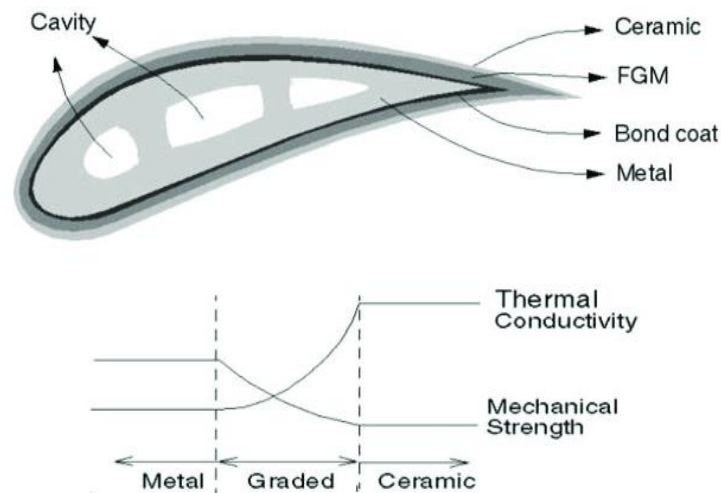


Ilustración 23. Blade FGM del sector aeronáutico fabricado por LMD

Cabe mencionar que la realización de este tipo de materiales es relativamente fácil de implementar a la tecnología LMD. Estos procesos de fabricación aditiva son capaces de producir una pieza con gradiente funcional directamente a partir de su modelo tridimensional (3D) asistido por ordenador (CAD) de la pieza. La pieza puede fabricarse fácilmente los materiales de gradiente funcional porque LMD puede utilizar más de un material simultáneamente [4].



## 5.5. Diseño de experimentos (DOE)

El diseño de experimentos o *Design Of Experiments* (DOE) es un método sistemático para determinar las relaciones que afectan a un proceso y el resultado de ese proceso. En otras palabras, se utiliza para encontrar relaciones de causa y efecto entre factores que puede aplicarse a cualquier proceso con entradas y salidas variables. El diseño de experimentos proporciona una herramienta estadística para poder analizar y describir cómo interactúan las numerosas variables de un ensayo con el fin de optimizar el resultado de una caracterización de materiales, por ejemplo.

Para comprender el DOE es necesario conocer primero algunos instrumentos estadísticos y conceptos de experimentación. Aunque el diseño de experimentos se puede analizar en muchos programas de *software*, es importante comprender los conceptos básicos de un experimento de estas características para su correcta aplicación. Los términos más utilizados en la metodología del DOE incluyen los factores de entrada controlables e incontrolables, sus respuestas, la comprobación de hipótesis, el bloqueo, la repetitividad e interacción.

- Los factores de entrada controlables, son aquellos parámetros de entrada que pueden ser modificados en un experimento o proceso. Por ejemplo, en el aporte de material mediante LMD, estos factores de entrada controlables incluyen el caudal másico de polvo aportado, la potencia del láser y la velocidad de avance de la boquilla.
- Los factores de entrada incontrolables son los parámetros que no pueden modificarse. En el ejemplo del aporte por láser, puede ser la temperatura en la se encuentra el sustrato. Es necesario reconocer estos factores para comprender cómo pueden afectar a la respuesta.
- Las respuestas, o medidas de salida, son los elementos del resultado del proceso que miden el efecto deseado. Volviendo al ejemplo del proceso aditivo, la geometría del cordón del aporte obtenido y las porosidades o faltas de llenado en dicho aporte.

Los factores de entrada controlables pueden modificarse para optimizar el resultado. La relación entre los factores y las respuestas se muestra en la próxima imagen (véase Ilustración 24).

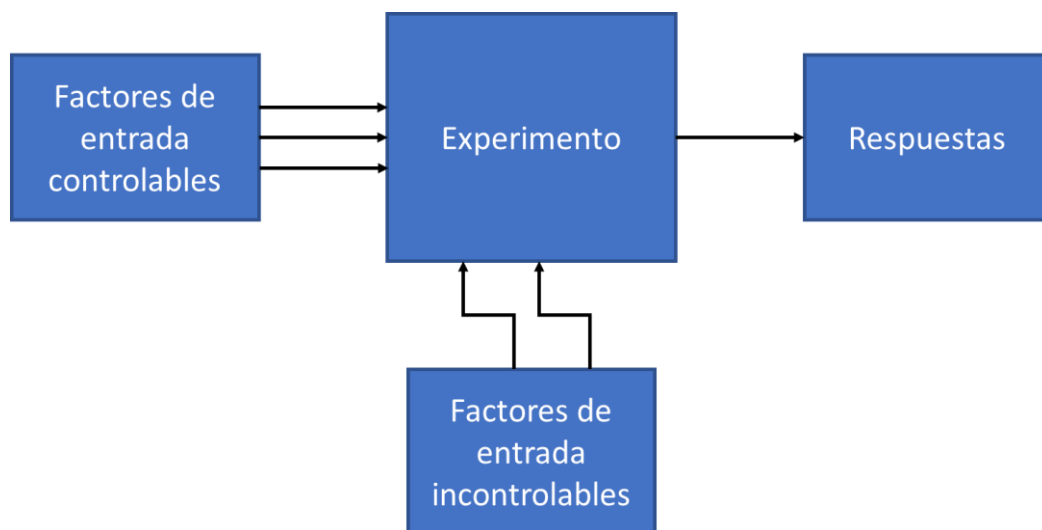


Ilustración 24. Diagrama de un DOE

La hipótesis establecida ayuda a determinar los factores significativos del proceso utilizando métodos estadísticos. La hipótesis se realiza a un nivel de significación, que se basa en una probabilidad.

El bloqueo es una técnica experimental para evitar cualquier variación no deseada en la entrada o el proceso experimental. Por ejemplo, un experimento puede llevarse a cabo con el mismo equipo para evitar cualquier variación del mismo. Los profesionales también replican los experimentos, realizando la misma combinación más de una vez, con el fin de obtener una estimación de la cantidad de error aleatorio que podría formar parte del proceso, o incluso, excluir singularidades dadas en el transcurso del experimento. Las principales preocupaciones en el diseño experimental son el establecimiento de la validez, la fiabilidad y la replicabilidad. Por ejemplo, esas preocupaciones pueden abordarse parcialmente tratando de reducir el riesgo de error de medición y asegurando que la documentación del método sea suficientemente detallada.

Cuando un experimento tiene tres o más variables, se requiere de una interacción entre ellas. Siendo la interacción la relación, acción o influencia recíproca de entre dos o más variables en una situación simultánea. Eso es de gran ayuda para la obtención de los parámetros ideales u optimización de un proceso. Los experimentos correctamente diseñados, hacen avanzar el conocimiento en las ciencias naturales y sociales y en la ingeniería.

En el presente estudio, se hace uso de un *software* programado para realizar DOE para la caracterización de los procesos LMD en el caso en el que se aporta Stellite-6 sobre un sustrato de acero laminado F-114. Esta caracterización no estaba prevista en la planificación desde un inicio, pero es indispensable para conseguir los objetivos preestablecidos, como se explicará en el apartado de la metodología de este documento.

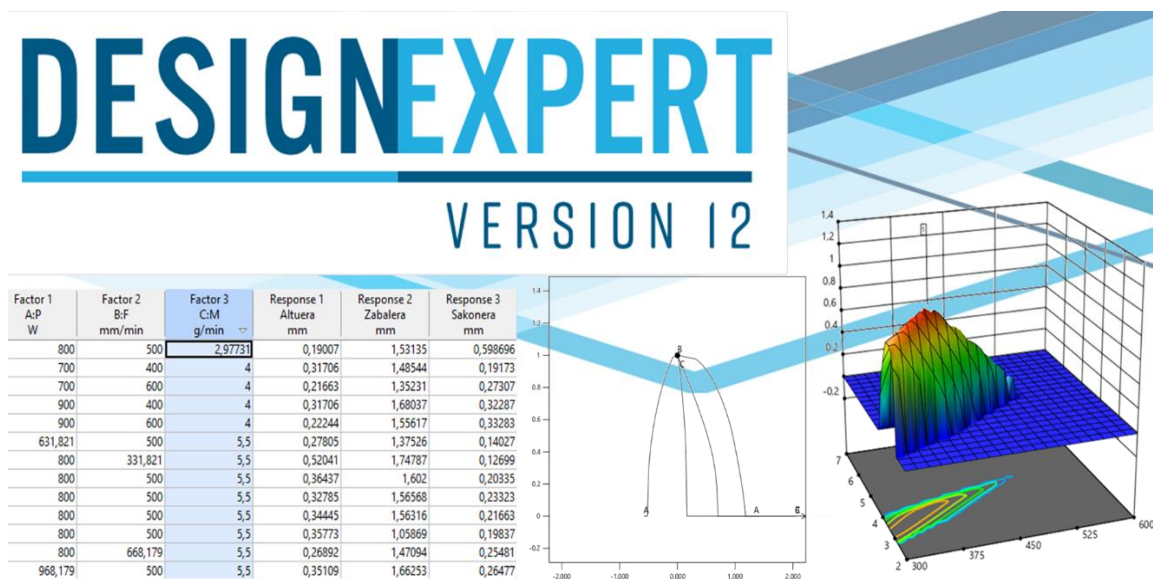


Ilustración 25. Programa Design Expert 12



El *software* seleccionado para este cometido es el “Design Expert 12”. Programa el cual busca factores y componentes vitales, caracteriza las interacciones y, en última instancia, consigue ajustes óptimos de proceso y recetas de productos. En dicho software es posible colocar banderas y explorar contornos en gráficos 2D interactivos y posteriormente visualizar la superficie de respuesta desde todos los ángulos con gráficos 3D giratorios. Por último, es posible maximizar la conveniencia de todas las respuestas simultáneamente y superponerlas para ver el "punto óptimo" que cumplen todas las especificaciones deseadas. “Design Expert 12” hace increíblemente fácil la aplicación de potentes herramientas de prueba multifactoriales. Es una herramienta que hace posible acelerar la investigación y convertirla en un gran éxito según sus diseñadores.

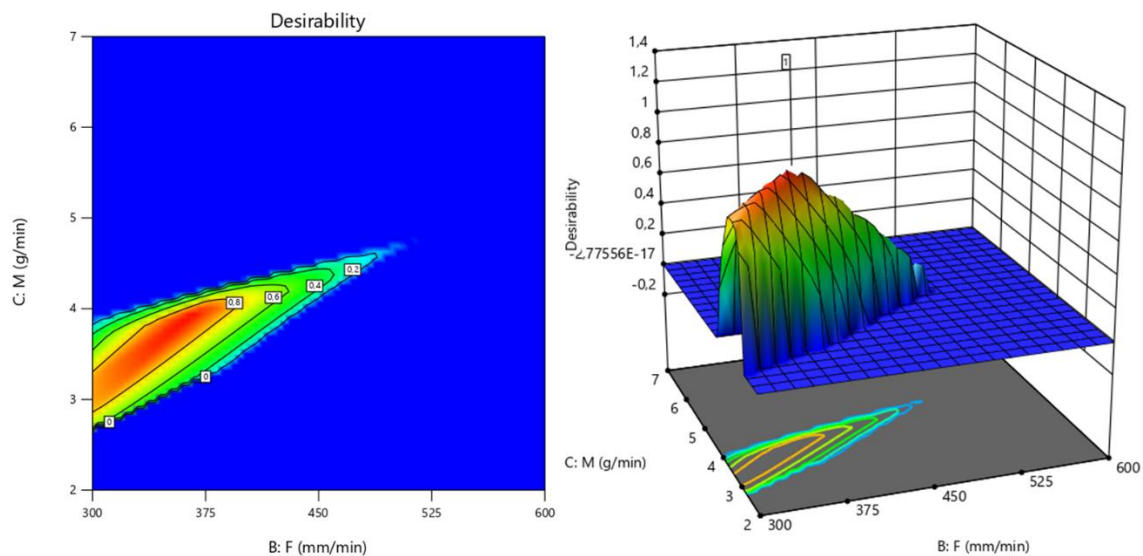


Ilustración 26. Representaciones gráficas del Design Expert 12

“Design Expert 12” proporciona poderosas herramientas para diseñar un experimento ideal sobre el proceso, mezcla o combinación de factores y componentes. En caso de duda, es capaz mediante cálculos de potencia en línea y la capacidad de añadir bloques y puntos centrales diseñar las entradas para un exitoso experimento. Los asistentes de diseño de “Design Expert 12” y los diseños intuitivos como la configuración de colores para las factoriales de varios niveles hace que el manejo de dicho programa sea mucho más fácil de lo esperado.

Este *software* hace fácil ver lo que surge como estadísticamente significativo y cómo modelar los resultados con mayor precisión. Proporciona la confianza necesaria para presentar y, tal vez, publicar los hallazgos. “Design Expert 12” ofrece una amplia selección de gráficos que ayudan a identificar los efectos más destacados y a visualizar sus resultados [19].

## 5.6. Descripción de equipos y materias primas necesarias

Para poder realizar las pruebas y ensayos pertinentes para el presente estudio, será necesario un conjunto de equipamientos. Para el correcto funcionamiento del proceso de fabricación aditiva LMD, es necesario un conjunto de maquinaria, ya sean equipos integrados como la mesa de posicionamiento del centro de posicionamiento o equipos no integrados como el alimentador de polvo. Por otra parte, también se utilizarán elementos no indispensables para el funcionamiento del proceso, como el termopar y el pirómetro de dos colores, elementos los cuales se necesitarán para la recopilación de información. Además de todo ello, será necesaria también maquinaria como la rectificadora para la preparación de los sustratos o el microscopio confocal Leica para la obtención de resultados. Los elementos necesarios para la realización del presente proyecto son los que siguen.

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

En la actualidad existen distintas clases de generadores láser, todos ellos pudiendo ser clasificados dependiendo de los parámetros físicos u operativos de dichos generadores.

De acuerdo con la explicación dada previamente, la variedad de láseres que se pueden encontrar hoy en día en el mercado son el láser de gas, láser de estado sólido, laser de dímero excitado (*excimer laser*), láser de colorante líquido, láser semiconductor y el láser de fibra.



Ilustración 27. Rofin FLO40

Estos generadores de altas prestaciones tienen muy en cuenta parámetros como la potencia media de salida, la longitud de onda del láser de fibra o las altas velocidades de aplicación que puedan tener para aumentar la productividad. También es indispensable que sean fáciles de integrar en sistemas 3D como en máquinas que puedan realizar procesos de fabricación en cinco ejes.

Los parámetros a tener en consideración del láser en los procesos LMD son el tipo de onda (pulsada o continua), la potencia media de salida, la distancia focal de la lente y el diámetro del haz láser o *spot*. Para dar una breve explicación de la función de estos parámetros en los procesos de aporte por láser hay que tener en cuenta que estas características variarán dependiendo si el tipo de onda es onda continua o es onda pulsada.

La potencia del láser, es el que aporta la energía suficiente para conseguir fundir la superficie del metal, con el fin de generar el *melt pool* para añadir el polvo. En caso de que no fuese un proceso de fabricación aditiva y con la potencia media suficiente, se podría llegar incluso hasta cortar el propio sustrato, la potencia es la fuente de energía, al fin y al cabo.

La distancia focal, sin embargo, es donde la lente del láser converge y concentra el haz, es decir, donde la luz del láser posee el diámetro más pequeño y donde mayor sería la energía suministrada en unidades de superficie.

El diámetro del *spot*, por otra parte, es el diámetro que presenta la misma luz del láser sobre la superficie del sustrato. Este diámetro no ha de ser siempre el diámetro de su distancia focal, es decir el diámetro mínimo, puesto que se suele aplicar de manera desenfocada obteniendo así un mayor diámetro en el sustrato, alcanzando una mayor área de acción para poder aportar.

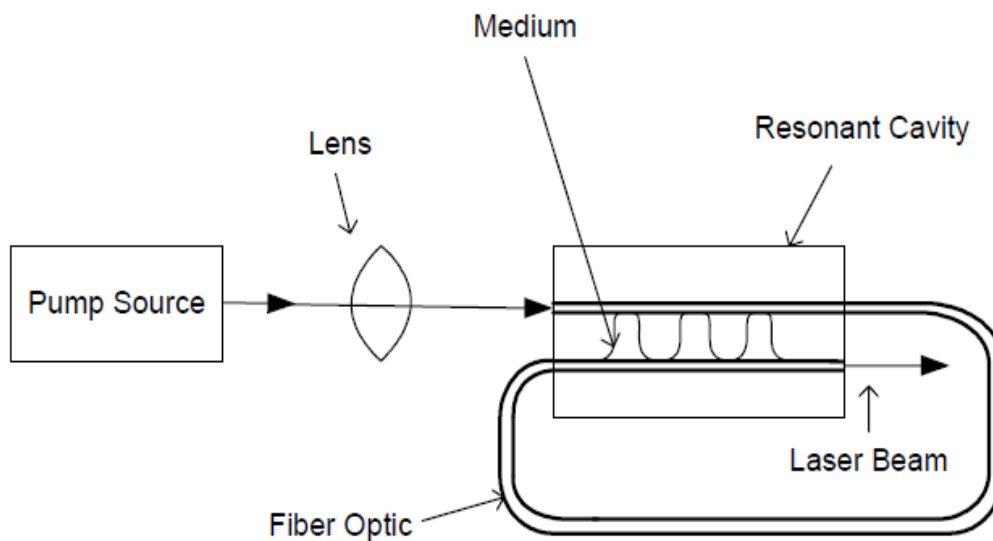


Ilustración 28. Esquema de un generador láser de fibra

El generador láser del taller de mecánica de la EHU/UPV, es un generador láser de fibra “Rofin FL 010”, estos láseres de fibra contienen una potencia media de salida de 1 kW. Este tipo de generador produce pulsos bastante cortos de manera resonante y concentra la luz gracias a una lente con el fin de introducirlo en la fibra óptica (véase Ilustración 28). El haz láser irá rebotando en todas direcciones por la fibra óptica hasta llegar al colimador. Una vez en el colimador, este proyecta todo el haz láser de forma paralela hacia las lentes. Esta serie de lentes, esta colocadas de tal forma que consiguen enfocar el haz láser hacia un único punto [13, 20].

Los generadores de láser de la Serie FL ofrecen grandes velocidades de aplicación y son sencillas de integrar en máquinas de 5 ejes o robots. Con el dispositivo láser FL, se pueden usar fibras ópticas con un gran rango de diámetros, desde diámetros pequeños de 50  $\mu\text{m}$ , hasta diámetros más anchos como el de 600  $\mu\text{m}$ , con una calidad de haz excepcionalmente buena.

En este proyecto el haz del láser se mantendrá desenfocado, es decir, la boquilla que contiene las lentes del láser se encontrará más alejada que a su distancia focal, a unos 15 mm. Gracias a ello, el diámetro en el *spot* será más amplio, un diámetro de 1.6 mm aproximadamente.

La potencia máxima que puede mantener este generador láser de fibra en el tiempo es de 1000 W y su longitud de onda es  $\lambda=1080\pm 10\text{nm}$ . La longitud de onda es un parámetro el cual hay que tener muy en cuenta a la hora de realizar ensayos con el láser, porque esta característica del láser influye en las propiedades de absorción del material y por lo tanto afectar de distinta manera la potencia del láser que se le pueda suministrar al material (véase Ilustración 29).

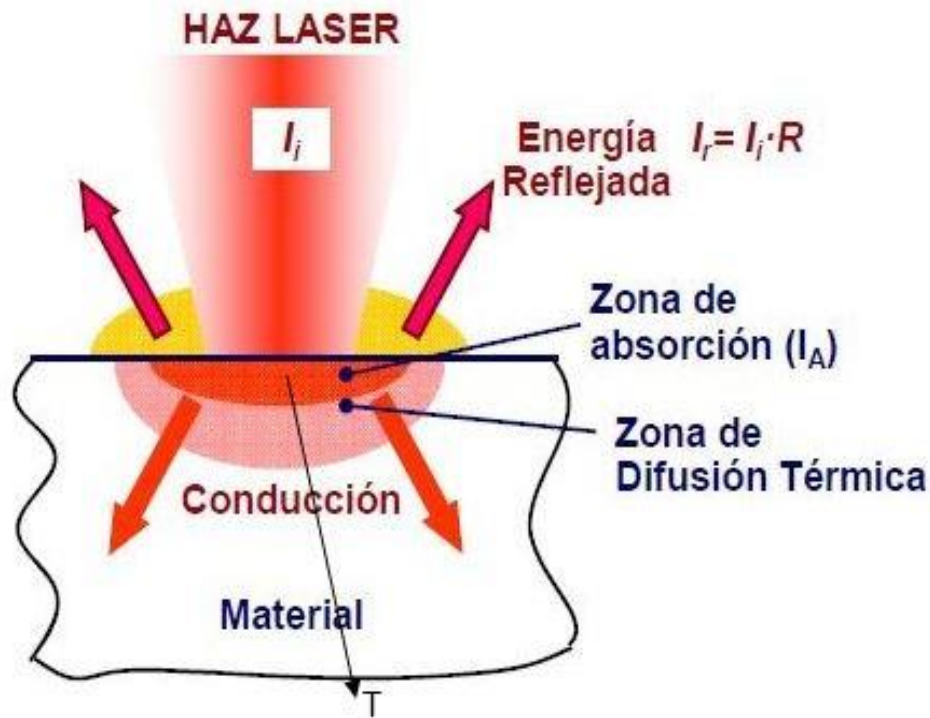


Ilustración 29. Descomposición del haz láser al llegar al sustrato

El haz láser, una vez habiendo contactado con la superficie del material, se descompone en tres maneras diferentes:

- La energía que refleja (R).
- La energía que absorbe mediante conducción.
- La energía que consigue traspasar el material (T) (véase Ilustración 7).

Lo habitual en la mayoría de los metales es que la longitud de onda,  $\lambda$ , se descomponga mayormente en energía reflejada, R, y conducción.

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

Este dispositivo es el responsable de suministrar polvo al centro de procesamiento láser, que es donde se realizará el aporte. El suministro de polvo es vital para la realización del proceso, puesto que ese es el polvo que se fundirá en la superficie del sustrato.

Aunque su función parezca que sea trivial, es de gran importancia que el flujo de polvo suministrado a la zona del proceso sea el indicado para conseguir la geometría deseada en el cordón o recubrimiento aportado.



Ilustración 30. Alimentador de polvo Sulzer Metco Twin 10-C

El alimentador de polvo “Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder” contiene dos tolvas totalmente independientes, cada tolva tiene su propio disco, caudalímetro, barómetro y panel de control (véase Ilustración 30). Al tener dos tolvas donde almacenar polvo, este alimentador tiene la capacidad de suministrar dos materiales distintos con caudales independientes para poder controlar la composición de la zona aportada.

Como se menciona en el anterior párrafo, las tolvas tienen la función de almacenar polvo. En esta tolva el polvo se calienta previamente a 60°C para eliminar la humedad que haya en ella y se inyecta un gas inerte para aumentar la presión en la tolva y en el disco. El polvo cae por gravedad sobre los discos, los cuales están girando a la velocidad previamente establecida para la obtención del flujo deseado. La presión ejercida por el gas hace el resto, puesto que en la salida del disco habrá menor presión, y eso facilitará la salida del gas de arrastre con el polvo.

El control del flujo de polvo suministrado al centro de procesamiento, se realiza controlando las revoluciones a las que gira el disco con el polvo y el caudal de gas de arrastre mediante el panel de control. Dicho flujo, llegará hasta la boquilla del láser y contendrá tanto gas de arrastre como polvo.

### 5.6.3. Sistema de refrigeración

Los sistemas de refrigeración son elementos indispensables para ese tipo de tecnologías. Las tecnologías láser alcanzan grandes temperaturas tanto en su generación como en su empleo, ya sea cortando o en procesos aditivos. Pero, así como en su empleo, la generación de calor más que un inconveniente es necesario para la realización del proceso, en la generación tan solo es un problema a resolver. Por esa razón, los equipos de refrigeración se emplean en las máquinas de generación láser, dadas las altas temperaturas que pueden alcanzar este tipo de equipos cuando están trabajando.

El sistema de refrigeración del generador láser del taller de mecanizado de la universidad, es un equipo "KKT Kraus OLB-5" (véase Ilustración 31). Por motivos de seguridad, el generador de láser nunca comenzará a suministrar láser al centro de procesamiento si el sistema de refrigeración no está activo.



Ilustración 31. Sistema de refrigeración KKT Kraus OLB-5

Estos equipos funcionan con agua mezclada con refrigerante "R 134", esta mezcla es bombeada por un circuito, el cual refrigera el calor creado en el generador láser y vuelve al dispositivo, en el dispositivo recorre un circuito interno que contiene intercambiadores de calor con aire para enfriar la mezcla. Este aire caliente se evacua gracias a la corriente creada por los ventiladores. Una vez enfriada la mezcla de agua y refrigerante, reposa en el tanque del equipo, a la espera de volver a ser bombeado al generador láser.



#### 5.6.4. Centro de fabricación aditiva

Todos los experimentos llevados a cabo en el estudio “Fabricación de recubrimientos de alta resistencia por LMD para estampación en caliente” son realizados en el centro de procesamiento de fabricación aditiva del taller de mecánica de la EHU-UPV.

Esta máquina a la que se está haciendo referencia es una “Kondia Aktinos 500”, se trata de un antiguo centro de mecanizado, para ser más específicos, un centro de fresado (véase Ilustración 32). Dicho dispositivo, ha sido modificado para trabajar como un centro de fabricación aditiva y adaptada para los procesos láser.



Ilustración 32. Centro de fabricación aditiva Kondia Aktinos 500

El centro de fabricación se maneja gracias al control numérico Fagor de su sistema, este CNC es el responsable de coordinar todos los procesos necesarios para la fabricación de la pieza. Entre los procesos a coordinar se encuentran el movimiento de la mesa de posicionamiento, el movimiento del eje de la boquilla, el control del plato giratorio y hasta el paso del mismo láser y su potencia.

La cinemática de este dispositivo funciona gracias a una mesa de posicionamiento que consta de dos ejes horizontales el cual se detallará en el próximo punto y la boquilla que proporciona el eje vertical. Por otra parte, se le podrían añadir dos movimientos angulares para poder trabajar como máquina de cinco ejes colocando el platillo divisor supletorio sobre la mesa de posicionamiento si se deseara.



### 5.6.5. Cinemática del centro de fabricación aditiva

Como se ha mencionado en el anterior punto, el centro de procesamiento de fabricación aditiva del taller del departamento de ingeniería mecánica de la universidad contiene una mesa de posicionamiento en su interior. Esta mesa en cuestión, tiene la capacidad de moverse en dos ejes horizontales, X e Y, para la realización de experimentos con absoluta precisión.

Por otro lado, se necesita un eje vertical para poder trabajar a distintas alturas y poder trabajar cerca de la distancia focal en diversas piezas. La propia boquilla y el escáner se encargan de esta función, es decir, funcionan como eje vertical Z. Con lo cual, la boquilla subirá y bajará dependiendo siempre de la necesidad de la pieza y el proceso a realizar.

El espacio de trabajo que disponen estos tres ejes, de la combinación mesa de posicionamiento y boquilla, es de 360 mm de largo (eje Y), 700 mm de ancho (eje X) y 380 mm de altura (eje Z).

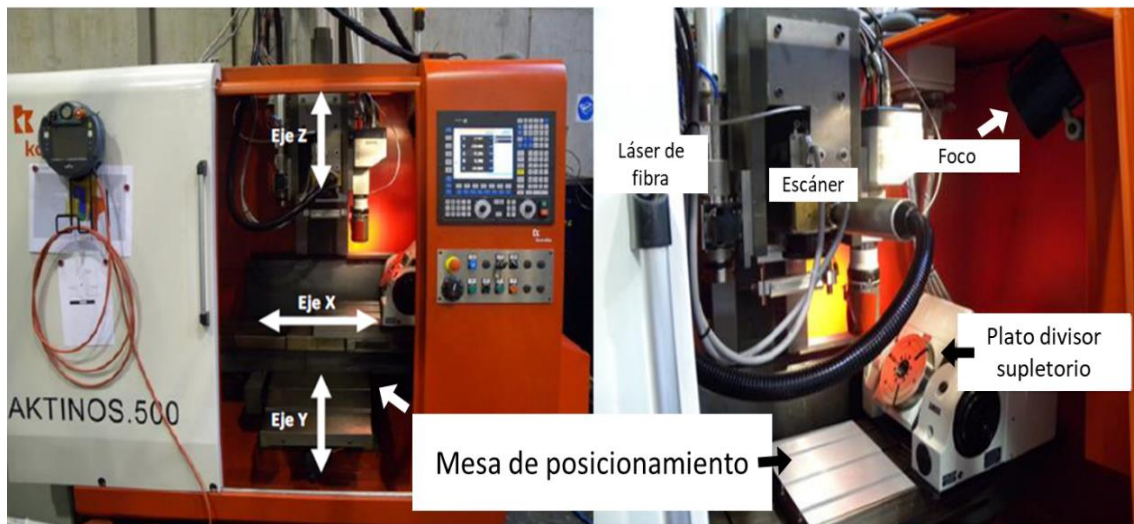


Ilustración 33. Cinemática del centro de fabricación aditiva

Como se puede observar en la imagen, existe la posibilidad de instalar un plato divisor supletorio sobre la mesa de posicionamiento. Este plato divisor tiene la capacidad de añadir dos movimientos angulares adicionales para la cinemática del centro de fabricación aditiva si fuese necesario. Con estos dos ejes supletorios, los dos de la mesa de posicionamiento y la del cabezal, se obtienen los cinco ejes con los que podría trabajar el sistema si la pieza así lo requiriese. Gracias a la movilidad que implementan estos cinco ejes al sistema, pueden llegar a realizarse piezas o reparaciones de piezas de geometrías complejas, las cuales serían imposibles de realizar mediante otros métodos de fabricación.

Para la realización del proceso, es necesario el movimiento relativo entre el cabezal y la pieza. Este movimiento suele realizarse de forma automatizada mediante el CNC, pero también dispone de la posibilidad de un movimiento manual. Dicho movimiento se suele utilizar para la colocación y alineación de la pieza, antes de que se realicen los experimentos, y establecer el punto inicial, los ceros, antes de ejecutar el programa previamente diseñado.

### 5.6.6. Boquilla (Nozzle)

La boquilla o *nozzle* es la responsable de hacer llegar de manera óptima a la zona de fabricación tanto el haz láser como el polvo o el gas de protección, además de tener que controlar la altura a la que se realizará el aporte. Para ello, la boquilla contiene diferentes salidas para poder dirigir cada una de ellas sobre la superficie del sustrato sobre la que se desea aportar (véase Ilustración 34).

En la boquilla están alojadas las lentes que consiguen enfocar el haz láser hasta un único punto, este haz en forma de cono pasa por el orificio central de la boquilla y apunta directamente a la zona de aporte sobre el sustrato. El problema que puede tener este sistema es que las partículas de polvo o la suciedad puede penetrar por este orificio y alojarse en la lente, obstaculizando así el haz laser y pudiendo quemar la lente hasta quedar inservible. Para evitar esta situación, se suministra un gas de protección por dicho orificio, este gas cumple una doble función durante el proceso LMD, por una parte, protege la lente evitando que cualquier impureza pueda penetrar por el orificio central, además, como el gas carece de opacidad no obstaculiza el haz láser para el correcto funcionamiento del proceso; por la otra, este gas, al ser un gas inerte, protege la zona del aporte de cualquier reacción que pueda generarse.

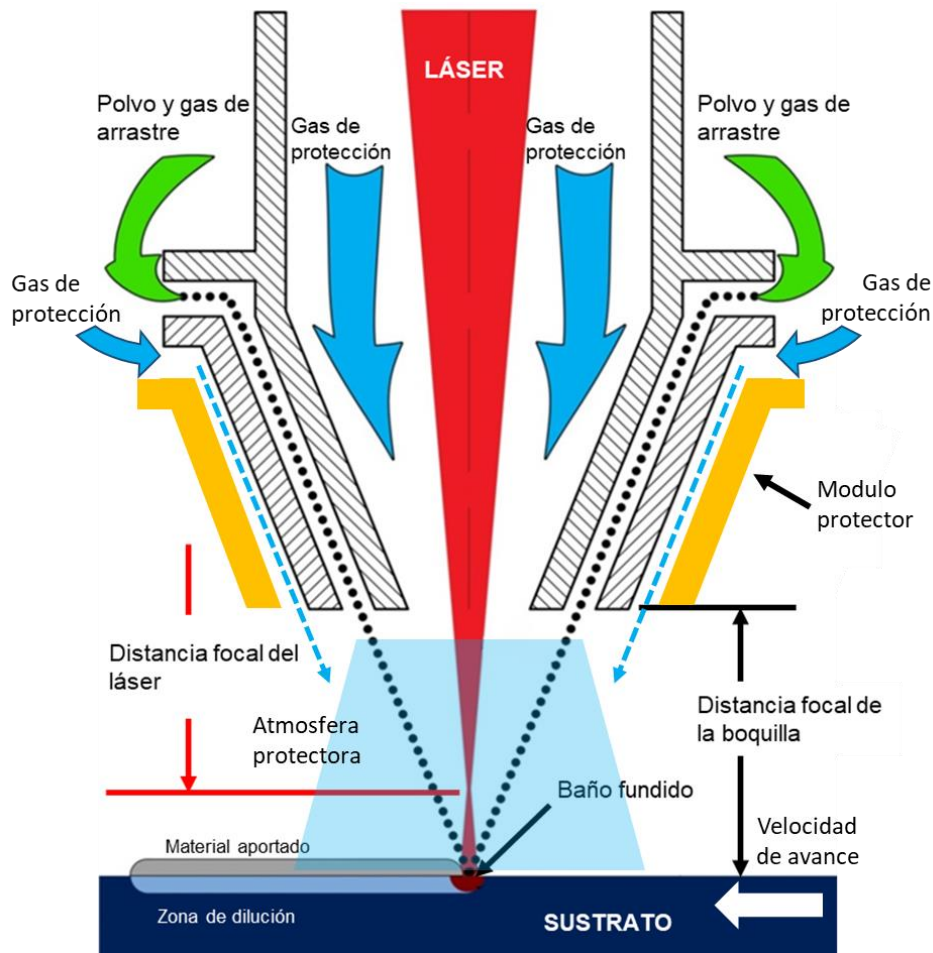


Ilustración 34. Esquema de la boquilla

Dejando a un lado el orificio central, existen dos salidas más en la boquilla, dos anillos, uno interno y el otro externo. Por el anillo interno es por donde se suministra el polvo hasta la zona del aporte para poder realizar el proceso aditivo y este polvo metálico llega administrado gracias al gas de arrastre a la boquilla de aporte. Hay que tener en cuenta

que en un inicio, las boquillas de los procesos de aporte por láser eran discretas, es decir, tenían un número determinado de orificios de salida alrededor del orificio central para suministrar el polvo junto con el gas de arrastre y dependían de la direccionalidad del aporte para poder obtener los cordones deseados mediante LMD; pero hoy en día, las boquillas como la que se está presentando, pueden trabajar de forma uniforme y continua, sin importar la direccionalidad de la boquilla. Esto se debe al simple hecho de que el agujero de salida actual es un anillo que rodea el orificio central y que suministra una cantidad uniforme de polvo a lo largo de todo el anillo. Otra de las características más importantes de la boquilla y este anillo interno, será la distancia vertical que existe entre la boquilla y la zona donde convergerá el polvo, es decir, la distancia focal de la boquilla.

Por otra parte, por el anillo exterior, se suministra el gas de protección periférico, el cual se utiliza únicamente para situaciones en las que es necesaria generar una atmosfera protectora en toda la periferia, expulsando gases como el oxígeno que puedan desencadenar una reacción en el sustrato comprometiendo la calidad metalúrgica del aporte. Este gas, como ya se detallará en el próximo punto, tan solo se utilizará con materiales altamente reactivos.



*Ilustración 35. Boquilla o nozzle*



*Ilustración 36. Distribución uniforme de polvo*

La interacción que existe entre los gases de protección con el gas de arrastre central determina en parte la calidad que pueda tener el aporte, es decir, la distribución del polvo en la zona del aporte la decidirá la combinación de ambos gases. De la misma manera, elegir la cantidad de polvo y caudal de gas dirigido al proceso determinará si el aporte se ha realizado correctamente o tiene defectos como porosidad o incluso faltas de llenado [14].

La boquilla de este centro de fabricación aditiva, desde un punto de vista cinemático, supone el eje vertical de este sistema, el eje Z, y el control numérico del centro de procesamiento láser desplaza este eje dependiendo las necesidades de fabricación de la pieza (véase Ilustración 35).

### 5.6.7. Gas

Como se ha mencionado en anteriores puntos, habitualmente se utilizan gases inertes en los procesos láser para tratar de evitar que el sustrato se oxide o reaccione. en los procesos de LMD en concreto, el argón es el gas más utilizado, seguido muy de cerca por el nitrógeno. El nitrógeno, a pesar de ser realmente económico comparándolo con el argón, mayormente no reacciona, pero, no siempre consigue proteger la superficie de la zona del aporte de las diferentes reacciones que puedan generarse. Por dar un ejemplo, en nitrógeno reacciona con elementos como el titanio, el niobio o con el vanadio.

Pero el desarrollo de los procesos LMD, también ha llevado a esta tecnología a realizar combinaciones de distintos gases inertes para lograr optimizar el proceso, como, por ejemplo, el uso del argón como gas de protección para lograr evitar la penetración de oxígeno a la zona del proceso y helio como gas de arrastre del polvo metálico. Tanto el helio como el argón son gases inertes, pero el argón tiene mayor densidad que el helio y gracias a ello, consigue evitar ciertas turbulencias que se generan al tratar de penetrar el gas de arrastre con el polvo en la corriente del gas de protección. Esta perjudicial turbulencia durante el uso del mismo gas como arrastre y protección se debe a que al tener la misma densidad, no consigue penetrar adecuadamente en la corriente, perjudicando así la concentración del polvo en el punto ocal de la boquilla. Esta solución de combinación de gases consigue evadir ese problema, puesto que, el helio con menor densidad, consigue penetrar junto con el polvo fácilmente en la corriente de gas de protección, el argón, a la hora de realizar el proceso.



*Ilustración 37. Botellas de argón*

La escasa disponibilidad del helio y el alto precio que tiene en el mercado son los mayores problemas de esta última técnica. El helio, tal como ya se ha comentado, es

un gas noble y de menor densidad que el argón. Este hecho es la razón de que el helio sea tan beneficioso para los procesos LMD, pero, sin embargo, resulta contraproducente para la extracción del mismo, ya que, de encontrar alguna bolsa de helio bajo tierra, volará rápidamente a la atmosfera si no se captura.

Las aplicaciones del helio han ido desarrollándose desde hará unos veinte años a la actualidad. Hoy en día es un gas que su uso está muy extendido en las altas tecnologías, actualmente es indispensable para las resonancias magnéticas, los cables de la fibra óptica, imanes superconductores, pantallas LCD o telescopios espaciales. También tiene grandes beneficios para la soldadura con arco o procesos similares dado su carácter inerte.

El argón por su parte, es el gas más común en los procesos LMD como ya se ha mencionado (véase Ilustración 37). Este gas noble, a pesar de ser más barato que el propio helio y, aun así, es particularmente caro, debido a su compleja forma de extracción. Este gas supone un 0.934% de la atmosfera.

El primer uso masivo del argón se produjo en lámparas o bombillas eléctricas. Actualmente, el corte y la soldadura de componentes metálicos supone la mayor parte del consumo de este componente gaseoso. Entre los distintos usos que pueda tener este gas, cabe mencionar los siguientes, la mezcla de argón con diversos gases como el vapor de mercurio o neón se usan para llenar lámparas fluorescentes de descarga eléctrica, se usa también para el relleno de los tiratrones de los contadores de Geiger-Müller de radiactividad, también se utiliza una atmósfera protectora de argón para poder manipular diversos reactivos químicos en los laboratorios, o incluso al precintar distintos materiales. Pero las técnicas de fabricación metalúrgica, constituyen el mayor desarrollo para el uso de este gas noble.

Como se ha comentado anteriormente, dada la forma de extracción el precio del argón es realmente elevado y la mayor parte de este gas inerte se extrae en plantas de separación de aire. En dichas plantas, se recoge aire de la atmosfera y posteriormente se licua y destila fraccionadamente. Dado que el punto de ebullición del argón que se desea obtener está entre el punto de ebullición del nitrógeno y el del oxígeno, tras las fracciones de destilación de las etapas correspondientes se puede lograr un compuesto rico en argón. Este compuesto rico en argón vuelve a tener otro proceso de destilación y se calienta y quema catalíticamente para la eliminación del oxígeno mediante hidrógeno. Por último, como etapa final, se realiza una última destilación la cual elimina el hidrógeno y nitrógeno restantes, logrando así un argón de gran pureza que contiene apenas un mínimo de impurezas o residuos, más que en unas partes por millón [21].

Durante el presente estudio, únicamente se utilizará un solo elemento como gas de protección y arrastre, el "Argón comprimido" de la empresa Nippon gases. Este tipo de gas comercial es el más utilizado en los procesos aditivos LMD, y contiene una pureza mayor a un 99,997% de argón [22].

Las botellas de gas comprimido suministradas por Nippon gases, tendrán dos funciones principales a completar durante el proceso de aporte por láser. Por una parte, el argón saldrá de la botella en dirección al alimentador de polvo, que aumentará la presión para poder llevar el polvo y dirigirlo a la boquilla del centro de fabricación aditiva para poder realizar el proceso LMD. A este gas que lleva el polvo de la tolva a la zona del aporte se le denominará gas de arrastre.





# NIPPON GASES

## The Gas Professionals

*Ilustración 38. Nippon Gases*

La segunda función de este gas es su uso como gas de protección, pero como se ha mencionado en el punto de la boquilla, existen dos tipos distintos de gas de protección. Uno de ellos es el gas de protección central, y su uso es imprescindible para todos y cada uno de los procesos LMD. Este corriente de gas cuida de que no se introduzca ninguna partícula en el habitáculo de las lentes del láser en la boquilla que pueda dañar las mismas y, además, también se ocupa de proteger el entorno del sustrato en la mayoría de los experimentos para que no reaccionen con el oxígeno. Pero, tratando de proteger la zona, si se enviase un flujo de gas superior al adecuado, podría generar porosidad o incluso faltas de llenado en el aporte, comprometiendo la calidad metalúrgica de la pieza.

El segundo gas de protección se denomina gas de protección periférica y se suministra por el anillo exterior de la boquilla. Este gas de protección no será necesario excepto en los casos extremos en los que la superficie del sustrato reaccione fácilmente con un mínimo porcentaje de oxígeno u otros elementos, como pueda ser en el caso del titanio. Este gas actúa generando una atmosfera o campana protectora en el entorno del proceso a fin de evitar de que cualquier impureza o el mismo aire de la atmosfera penetre.

Estos gases de protección se suministran directamente desde la botella, por lo que el uso de otro gas de carácter inerte diferente al gas de arrastre para realizar la función de protección del proceso sería realmente fácil de realizar; para continuar con el ejemplo dado anteriormente en este punto, argón como el de protección y helio como el gas de arrastre, teniendo este segundo menor densidad. Gracias a este tipo de combinaciones, se consiguen evitar en parte las turbulencias originadas en el proceso de fabricación aditiva entre los gases de arrastre y los gases de protección central en la confluencia de las mismas. La solución a este problema radica en la diferencia de densidad de los distintos gases.

### 5.6.8. Sustrato

El material donde se realiza el aporte es el acero laminado F – 114, una aleación muy utilizada en la industria de la máquina herramienta para moldes, bloques hidráulicos, portamoldes y elementos de maquinaria que deban tener buena resistencia, ejes, cigüeñales, manguitos, transmisiones o cañones.

Esta aleación de acero de base manganeso, carbono y silicio es típicamente utilizado en elementos de máquinas de buena resistencia (véase Tabla 2). Estos aceros al carbono son de uso general, para piezas con una resistencia media de 650 – 800 N/mm<sup>2</sup>, además de ser aptos para temple superficiales [23].

Tabla 2. Composición química (%) común del acero F – 114

C	Mn	Si	P	S
40-50	50-80	≤ 40	≤ 4,5	≤ 3,5
Cr	Ni	Mo	V	
Cr + Mo + Ni ≤ 63			-	

Estas aleaciones son adecuadas para templar, se podrían emplear para elementos templados por inducción que requieren durezas superficiales de 55 HRC. También son adecuados para la soldadura, en los que se suele requerir un precalentamiento a 200-250°C y posterior enfriamiento lento controlados, además de tener que realizar un tratamiento térmico final para aliviar las tensiones generadas en la soldadura.

Además de ser adecuado para soldar, el acero laminado F – 114 ha sido seleccionado por su ductilidad cuando no está tratado térmicamente, gracias a ello será capaz de soportar el continuo estampado que sufrirá en el proceso de fabricación de las piezas. Pero como se ha mencionado, su capacidad para ser soldado es clave para el presente estudio, ya que, existe una gran similitud entre los procesos de soldadura y el LMD.

El laminado consiste en precalentar el acero fundido a la temperatura en la que se pueda deformar el lingote por estiramiento y desbaste que se realiza en una cadena de cilindros a presión denominado tren de laminación. Los cilindros van logrando el perfil deseado hasta formar las dimensiones deseadas. Bastantes veces hay que someter estos productos a mecanizaciones para ajustar las piezas a las tolerancias requeridas.

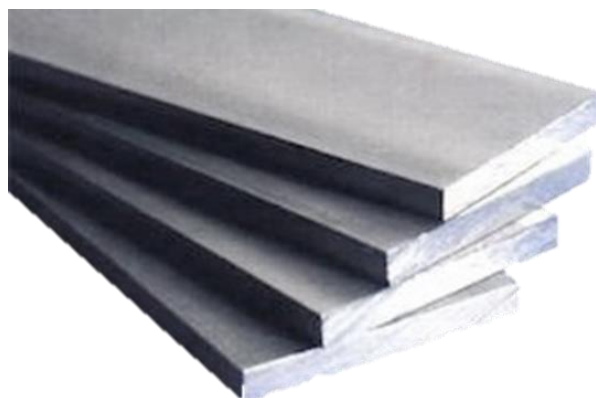


Ilustración 39. Acero laminado F – 114



### 5.6.9. Polvo (*Powder*)

El polvo metálico es la materia prima y característica especial necesaria para los procesos aditivos (véase Ilustración 40). Este material se deposita en la tolva del alimentador de polvo y antes de comenzar con ningún proceso LMD, se precalienta el polvo dentro de la tolva para eliminar la humedad que pueda tener. Tras calentarla a unos 60°C se aumenta la presión interna del alimentador con el gas de arrastre para, posteriormente, conducir el polvo desde el disco del alimentador por el tubo y de ahí, hasta la boquilla donde será expulsado a la zona del aporte por el anillo interno de la boquilla. Al salir de la boquilla, junto con el gas de arrastre, terminará en el punto focal de la boquilla donde el láser ha fundido la superficie del sustrato, para terminar fundiéndose en esta misma superficie para la generación de un cordón que estará sobre el sustrato.



*Ilustración 40. Polvo metálico para procesos de aporte por láser*

Existe una amplia gama en lo que respecta a polvos metálicos como, por ejemplo, el polvo de MetcoClad 718, un polvo de base níquel, cromo y molibdeno. Estos polvos no han de ser necesariamente metales puros, como se ha podido demostrar con el MetcoClad 718. Por ejemplo, los polvos necesarios para la realización de este proyecto, el Stellite 6 y el carburo de tungsteno (WC), son aleaciones comunes que están a la orden del día.

Las composiciones químicas de los polvos a utilizar en los experimentos es la que sigue, como podemos observar en las próximas tablas (véanse Tabla 3 y Tabla 4).

*Tabla 3. Composición química (%) común del polvo Stellite 6*

<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Si</b>	<b>C</b>
Balance	27-32	< 2	0,9-1,4
<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>W</b>
< 3	< 3	< 1	4-6

Tabla 4. Composición química (%) común del polvo de carburo de tungsteno

W	C	Otros
Balance	4,11	< 0,2

La selección de los elementos a utilizar se realiza en base a un estudio bibliográfico previo, en el que se busca a partir del sustrato base de material dúctil y económico como es el acero laminado F – 114, realizar una transición progresiva de las propiedades de la pieza hasta una alta dureza en la superficie. Para ello, el primer material seleccionado es el Stellite 6, un material con las características adecuadas para ser soldado y muy común en el ámbito de los recubrimientos. Este elemento de base cromo, tungsteno y cobalto es ideal para herramientas sometidas a extremo impacto, corrosión, fricción y abrasión, además de tener una alta dureza. También soporta los cambios bruscos de temperatura, tales como los continuos ciclos de la estampación en caliente, por otra parte, es excelente también para piezas metálicas tales como las válvulas, punzones en caliente o dados de forja [24, 25, 26, 27, 28, 29].

El segundo material seleccionado es el carburo de tungsteno, este material ha sido elegido por la necesidad de endurecer la superficie del útil de los procesos de estampación en caliente. Este elemento se utiliza fundamentalmente en la fabricación de maquinarias y útiles para trabajar el acero, los filos de corte de estas herramientas resultan ser más eficientes que los de los aceros rápidos o aceros al carbono. Pero este material no solo se utiliza en la industria de la fabricación, a menudo se utiliza en munición perforante, instrumental quirúrgico o como relector de neutrones en el sector nuclear. Durante el estudio bibliográfico de este componente no natural, se ha podido observar que la dureza de los materiales aumentaba a medida que el porcentaje de carburo de tungsteno en peso de la composición incrementaba también. Esto se debe a que gracias al incremento del carburo de tungsteno la microestructura del material va variando, logrando así unas altas prestaciones en la pieza donde se ha realizado el aporte [26, 28, 30].

Así pues, el objetivo de estos materiales seleccionados será tener una dureza baja en las inmediaciones del sustrato debida a la dilución con la misma, e ir aumentando la dureza hasta la superficie junto con el aumento de la fracción de peso del carburo de tungsteno.

Los polvos metálicos son cancerígenos, se debe tener especial cuidado durante la manipulación de este tipo de compuestos e ir siempre protegido con gafas protectoras, guantes de látex y máscara.

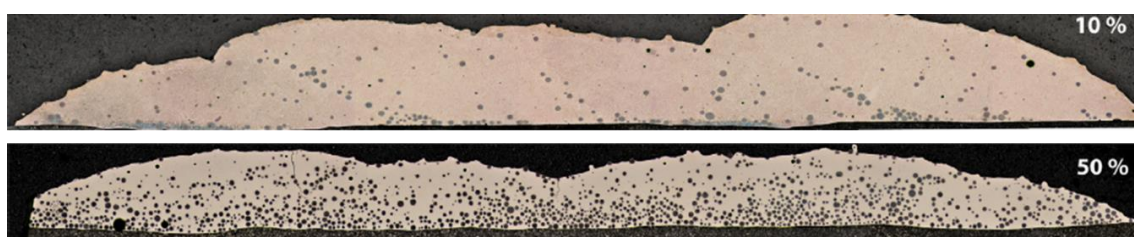


Ilustración 41. Recubrimiento LMD de NiCrBSi con diferentes porcentajes de adición de WC en peso

### 5.6.10. Ataque electrolítico

Los ataques metalográficos se basan en procesos de corrosión controlada y son el resultado de procesos químicos o electrolíticos que se emplean para los procedimientos de pulido metalográfico. Las distintas fases internas de una muestra contienen las diferencias de potencial existentes sobre la superficie de la probeta y estas diferencias de potencial en la superficie provocan distintos comportamientos electrolíticos. Por esa razón, al aplicar un ataque concreto a una probeta, las distintas zonas que hay en ella se verán atacadas de distinta manera, dejando visible dichas zonas gracias a la diferente corrosión sufrida. En resumen, los ataques mejoran el contraste sobre las superficies de la probeta con el fin de poder visualizar la microestructura [31].

Para conseguir realizar una inspección con el microscopio de la micro o macroestructura, es necesario influir sobre las propiedades ópticas de los límites de grano, distintas fases o superficies del grano para poder hacer visible el perfil de la superficie. Por ello se realizan ataques en metalografía, los cuales suponen una influencia controlada sobre dichas superficies con el objetivo de hacer esto posible. Hay que tener en consideración que existen diferentes métodos para realizar los ataques, y es imperativo realizar una buena elección del ataque a realizar dependiendo del material que se desee atacar y lo que se quiera visualizar. Estos métodos pueden dividirse en dos ramas, los ataques químicos y los ataques electrolíticos:

- Los ataques químicos requieren un pulido fino, si se desea visualizar la microestructura de la superficie, o esmerilarlo, si se desea analizar la macroestructura. El ataque se suele realizar con un fluido reactivo sobre la superficie que se desea estudiar (véase Ilustración 42).

Los ataques que se realizan para lograr visualizar la macroestructura, permiten analizar la superficie de la probeta con una simple lupa, ampliable a lo sumo, hasta unos 25 aumentos. Sin embargo, el ataque para visualizar la microestructura ha de ser mucho más incisivo, ya que, para permitir una inspección microscópica, debe diferenciar los límites de granos y fases que se distinguen con hasta 1.000 aumentos, con un microscopio óptico, o más incluso con el microscopio electrónico.

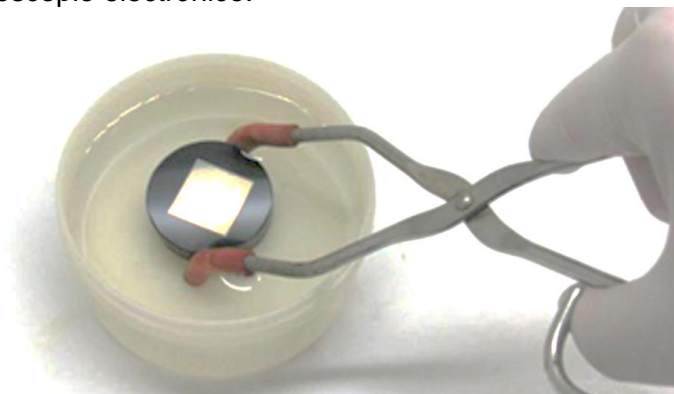
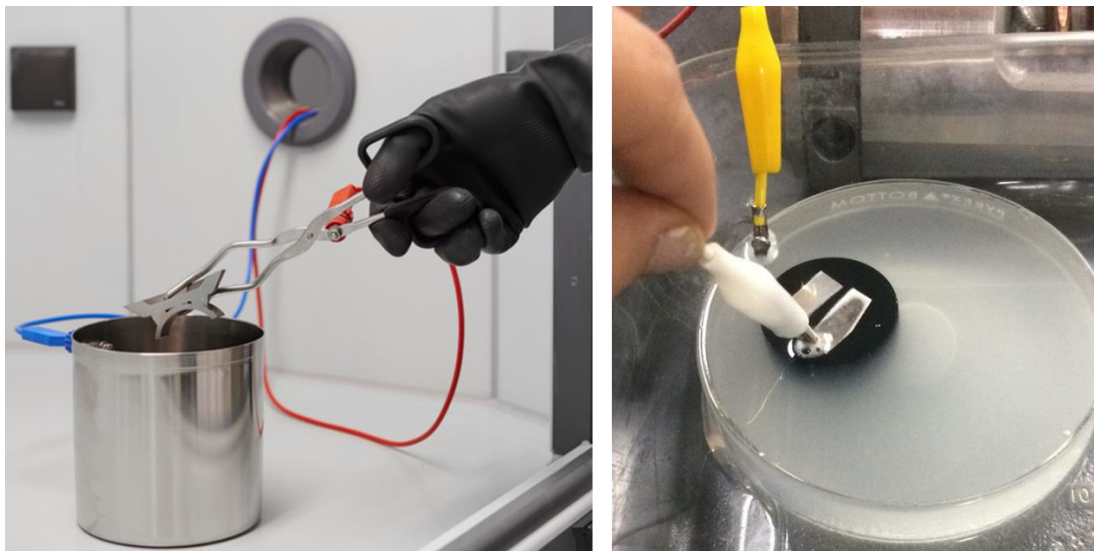


Ilustración 42. Ataque químico metalográfico

- Los ataques electrolíticos requieren de muestras con conductividad homogénea y el potencial eléctrico se aplica a la pieza utilizando un circuito externo. El principio de los ataques electrolíticos es el mismo que el de los ataques químicos, la probeta se sumerge en una disolución electrolítica la cual contiene el reactivo en una disolución acuosa, como por ejemplo el caso que ocupa a este estudio, ácido oxálico.

En este ataque, tanto el ánodo como el cátodo se sumergen junto con la probeta. Uno de los extremos, el ánodo, se pone en contacto con la probeta, y el otro extremo, el cátodo, simplemente sumergido. Durante los ataques electrolíticos, un porcentaje de los iones metálicos positivos de la pieza se desprenden desde la superficie de la probeta a analizar, para disolverse dentro de la disolución electrolítica y, una cantidad equivalente (a los iones metálicos positivos desprendidos) de iones, se depositan sobre la superficie de dicha muestra para poder diferenciar las distintas zonas.

Las disoluciones que se emplean en este tipo de procesos pueden ser alcalinas, salinas o ácidas. Dichos procesos de ataque, suelen ser controlados mediante el tiempo y voltaje de la ejecución de la misma. Los ataques electrolíticos, a diferencia de los químicos, suelen ser utilizados comúnmente para remarcar bordes de grano o fases específicas. Son realmente sencillos de efectuar y controlar el ataque para que no se quemé. Por otra parte, son bastante seguros y normalmente obtienen mejores resultados que en los ataques por inmersión.



*Ilustración 43. Ataque electrolítico metalográfico*

La calidad de la superficie influye para ambos métodos, tanto las deformaciones, como las marcas en la superficie o cambios de plano inciden, dependiendo del objetivo de este proceso, en los resultados que se obtendrán con el ataque e influirán en la fase o estructura que se intenta visibilizar. Además, es sumamente importante la elección correcta del reactivo o el electrolito a utilizar, además de los parámetros necesarios. Porque, de realizar mal la elección, podría suponer la imposibilidad de obtener los resultados requeridos de la estructura de la superficie de la muestra en estudio.

En el caso que ocupa a este estudio, el ataque electrolítico en un entorno de ácido oxálico, la tensión aplicada en la solución y el tiempo de exposición a esa tensión son determinantes con el fin de lograr unos resultados que muestren con claridad la estructura superficial de la probeta en estudio. En el ataque químico en cambio, el tiempo de exposición es el parámetro más importante para un exitoso proceso, y en ocasiones, la temperatura también influye bastante.

Todos estos procesos se han de realizar con las respectivas medidas de protección como gafas protectoras, guantes de látex o máscara para respirar.

### 5.6.11. Durómetro

Uno de los análisis que se realizará para la comprobación de la calidad metalúrgica del recubrimiento FGM será el análisis de microdurezas. En este análisis se obtendrán los datos de las durezas desde la base del sustrato hasta superficie del recubrimiento mediante el durómetro "Future-tech microhardness tester FM-800" del taller de metrología.

Estos ensayos determinan la dureza del material en base a la deformación generada tras aplicar una fuerza durante un tiempo determinado con una punta de un material de referencia, por ejemplo, el diamante, sobre la superficie.

Las marcas obtenidas mediante el durómetro tendrán una menor o mayor profundidad dependiendo de la dureza del material en esa posición exacta. Para poder evaluar durezas en materiales con recubrimiento las cargas a aplicar serán muy bajas para evitar la influencia de las inmediaciones, de esta manera, el durómetro deberá tener la capacidad de analizar marcas de penetración muy leves, únicamente visibles mediante microscopio.

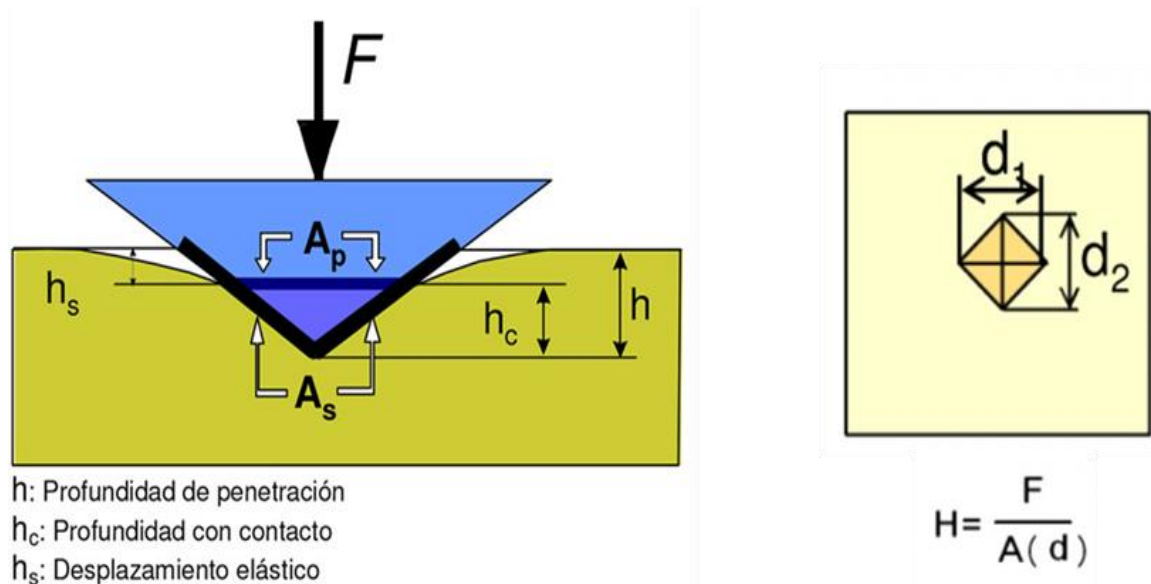


Ilustración 44. Obtención de las marcas para la medición de la dureza

El cálculo de la deformación del material se obtiene a partir de la relación entre las variables de referencia como la fuerza aplicada o la dureza del indentador y las diagonales de la marca de penetración generadas. El durómetro realiza una serie de operaciones trigonométricas para la obtención del valor de la dureza y da su valor en las unidades de dureza deseadas.

El durómetro contiene un sistema de aplicación de cargas la cual se puede regular, tanto en fuerza como en tiempo de aplicación, un sensor el cual realiza la medición del desplazamiento, un indentador guiado de penetración y el sistema electrónico para el cálculo de la dureza con las variables de entrada.



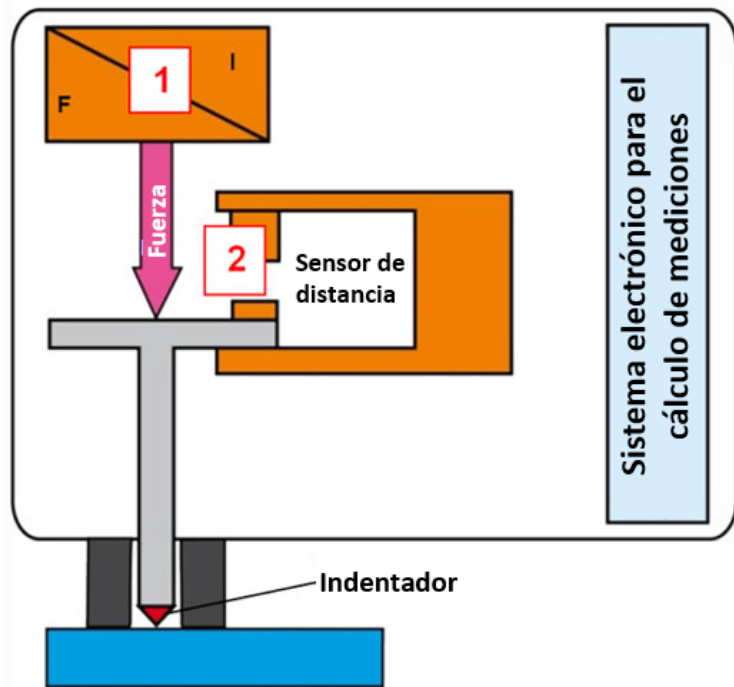


Ilustración 45. Esquema de un durómetro

Para el cálculo de las microdurezas, estos aparatos suelen ir equipados con dispositivos ópticos para poder visualizar las marcas de penetración. Dispositivos ópticos tales como cámaras digitales o microscopios, estos equipamientos permiten evaluar la huella de manera más detallada. [32]

## 6. Metodología

El proyecto “Fabricación de recubrimientos de alta resistencia por LMD para estampación en caliente” investiga la optimización de los útiles de los procesos de fabricación por estampación en caliente. Busca la fabricación de un recubrimiento de altas prestaciones mediante materiales con gradiente funcional dada la escasez de información en relación a este campo específico. Por ello, y por dar inicio a este proyecto, se realiza una investigación y recopilación de los datos disponibles sobre todos los procesos necesarios para llevar a cabo el estudio, como los procesos de fabricación aditiva LMD, los procesos de estampación en caliente y sus necesidades, los materiales con gradiente funcional, la materia prima con la que se propondrá realizar el proyecto de investigación y sobre los procesos de soldadura u otros procesos similares al ámbito del aporte por láser sobre los que haya más información de estudios realizados.

Se decide utilizar argón como gas de arrastre y protección por ser el elemento más común en los procesos de aporte por láser. Los experimentos se realizan sobre un sustrato de un centímetro de espesor para soslayar efectos térmicos indeseados, como pueda ser el pandeo del mismo.

Al ser los materiales del recubrimiento la clave de todo el proyecto, se realiza una indagación más exhaustiva de los materiales propuestos para los experimentos, para la ampliación de conocimiento de dichos materiales, su comportamiento como materiales con gradiente funcional y materias prima de procesos de aporte de adición de polvo por láser. Tras la aceptación de los materiales propuestos, la puesta en marcha de los experimentos se efectúa en el taller del Departamento de Mecánica de la UPV – EHU con el equipo mencionado en el estado del arte.



Ilustración 46. Escuela de Ingeniería de Bilbao UPV/EHU



## 6.1. Planificación I

Tras haber realizado un profundo análisis de todos los temas a tratar y teniendo en mente los objetivos a conseguir y el alcance del proyecto, se realiza la planificación para lograr dichas metas. En primer lugar y para dar inicio al proyecto, se decide el procedimiento a seguir y las etapas a completar antes de realizar el recubrimiento sobre el sustrato.

En un principio, una vez establecidos los parámetros de aporte del centro de fabricación láser para el Stellite 6 y antes de realizar el primer proceso de aporte, se necesita saber las revoluciones a las que trabajarán los discos del alimentador de polvo en la primera prueba. Al obtener todos los parámetros necesarios para la realización del ensayo, se procederá con la primera prueba. Esta primera prueba de control se realizará con los parámetros con los que se quiere realizar el recubrimiento final, aportando únicamente unas primeras capas sobre el sustrato. Esto servirá para ver si estos parámetros seleccionados son los adecuados, analizando la evolución del aporte en su crecimiento, geometría o fallos que hayan podido surgir bien durante el proceso o incluso en la solidificación.

Después de la primera comprobación realizada, se ajustarán los caudales máxicos de aporte si fuese necesario y se volverían a calcular las revoluciones del alimentador de polvo necesarias para la segunda prueba. La segunda prueba trata de realizar el recubrimiento final del sustrato y analizar en ella todos los datos posibles como, por ejemplo, la geometría, la distribución del carburo en el recubrimiento, las durezas o posibles fallos que puedan surgir para saber si el recubrimiento fabricado es el ideal o se puede optimizar el proceso a fin de obtener un recubrimiento que cumpla con las prestaciones necesarias para ser inmejorables para las estampas de los procesos de estampación en caliente.

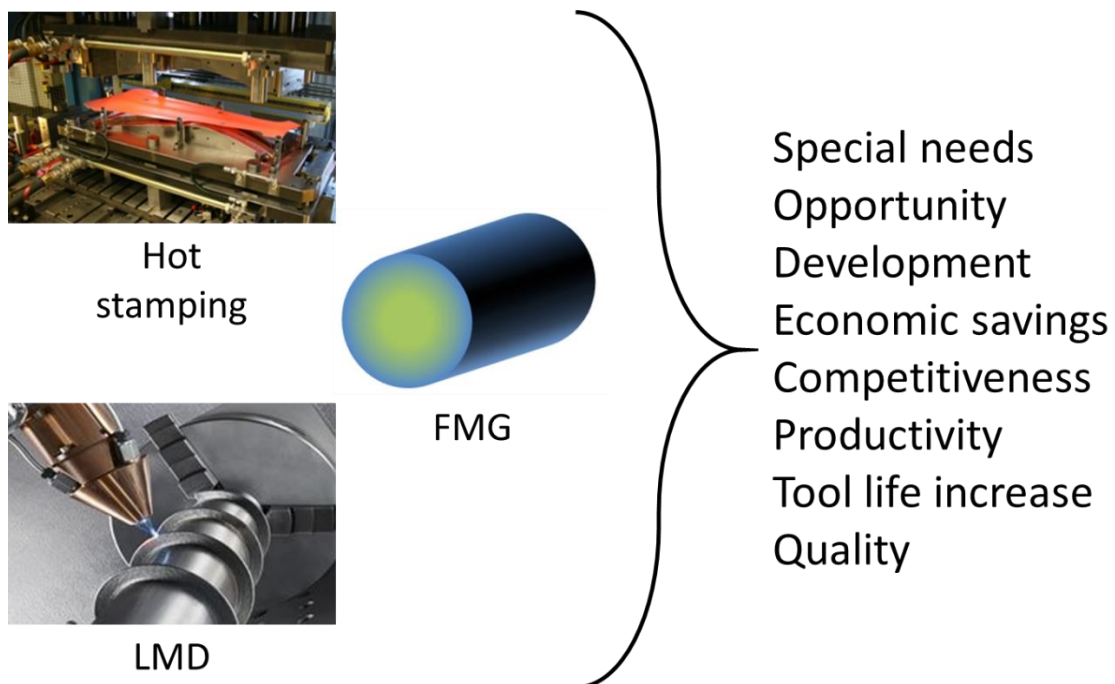


Ilustración 47. Beneficios del proyecto

## 6.2. Preparación previa al ensayo I

Antes de comenzar con cualquier experimento, existen una serie de factores que es necesario tener preparados previamente. Por una parte, se ha de tener claro los parámetros con los que se va a trabajar y si se tiene todo lo necesario para trabajar en esas condiciones. Los parámetros utilizados para los aportes serán los idóneos para el material base del FMG, el Stellite 6, material que tiene muy buen comportamiento en la soldadura (véase Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros base de aporte del Stellite 6

P [W]	F [mm/min]	$\dot{m}_{s6}$ [g/min]
800	500	5,5

En este caso faltarían las revoluciones necesarias en el disco del alimentador de polvo para obtener el caudal másico de aporte requerido para ambos materiales. Para realizar dicho cálculo, se decide realizar una prueba de dos minutos de duración en la que el alimentador suministra polvo a un recipiente el cual se pesa en una báscula de gran precisión tras realizar la prueba. El objetivo de esta prueba es conseguir el peso deseado en dos minutos con un porcentaje de revoluciones constante en la prueba. Se habla de porcentaje de revoluciones porque el alimentador de polvo trabaja en porcentajes sobre las velocidades máximas a las que pueden llegar a alcanzar sus discos (10 rpm). La duración de esta prueba tan sencilla es de larga duración para intentar minimizar los efectos adversos que pueda tener la inestabilidad del flujo al iniciar el dispositivo y recoger unos datos más fiables gracias a la parte del proceso estable, además, el proceso se repite varias veces para comprobar la veracidad de los cálculos realizados (véase Tabla 6).

Tabla 6. Cálculo de revoluciones del alimentador de polvo I

Capas	$\dot{m}_{s6}$ [g/min]	$\dot{m}_{wc}$ [g/min]	rpm <sub>s6</sub> [%]	rpm <sub>wc</sub> [%]
1 – 2	5,51	0	15,7	0
3 – 4	5,13	0,6	14,8	3,7
5 – 6	4,82	1,27	13,8	7
7 – 8	4,43	1,94	12,7	10,7
9 – 10	4,01	2,76	11,5	14,8

Puesto que los porcentajes másicos de los dos materiales aportados van variando capa a capa, la medición de cada uno de ellos será individual para una mayor exactitud. Y como se explicará más adelante en este mismo apartado, se realizarán diez capas para el recubrimiento final, empezando en las primeras dos las cuales están compuestas íntegramente por Stellite 6. El porcentaje másico del polvo suministrado irá variando cada dos capas con un aumento del 10% en carburo de tungsteno hasta alcanzar el

40% en las últimas dos capas. La idea inicial era ir aumentando el porcentaje de carburo de tungsteno manteniendo el flujo de Stellite 6 pero, la cantidad de polvo aportada era excesiva, así pues, se decide reducir en pequeñas cantidades el flujo de Stellite 6 aportado manteniendo los porcentajes máxicos, con lo que el flujo máxico total seguirá aumentando, pero en menor medida.

Por otra parte, dejando a un lado los parámetros de aporte del ensayo, es necesario tener bien definido que se precisa para que la prueba de control realmente funcione. Por ello, y para poder distinguir mejor donde se ha producido el fallo si lo hubiere, se ha decidido realizar sobre un sustrato aporte de capas de manera escalonada.

Con el fin de obtener los sustratos para los posteriores experimentos con las dimensiones requeridas, se corta la barra de acero F – 114 con la sierra metalúrgica disponible en el taller de la universidad, con un disco para aceros al carbono.

Posteriormente, se rectifica la superficie de los sustratos mediante la muela de la máquina rectificadora, colocando los sustratos amordazados sobre la mesa de la misma máquina. Una vez estar rectificados, se limpia la superficie de ambos sustratos con etanol para poder evitar que suciedad o taladrina quede sobre la superficie y pueda dañarla.

### 6.3. Ensayo de control

Como se ha mencionado en el apartado anterior, en el ensayo de control se busca saber si los parámetros utilizados son buenos o de haber algún fallo, donde se produciría. Con ese fin, los aportes se realizarán de manera escalonada hasta la quinta capa de aporte sobre el sustrato.

El ensayo de control se somete sobre un sustrato con 70 mm de largo, 70 mm de ancho y 10 mm de espesor de dimensiones, es decir, con espacio suficiente para evacuar el calor minimizando el efecto borde y con el espesor suficiente para evitar el pandeo u otras aflicciones térmicas. Las primeras dos capas de íntegro Stellite 6, se realizan sobre el centro de la superficie rectificada del sustrato, con unas dimensiones de 60 x 60 mm de ancho y largo respectivamente. Esas dos primeras capas, se realizan sin dilación alguna sobre todo el sustrato, porque dada la buena soldabilidad de este material no se espera ningún fallo en el aporte. Cabe mencionar que el solape realizado durante todos los experimentos de este trabajo será de un 40% entre cordones (véase Ilustración 48).

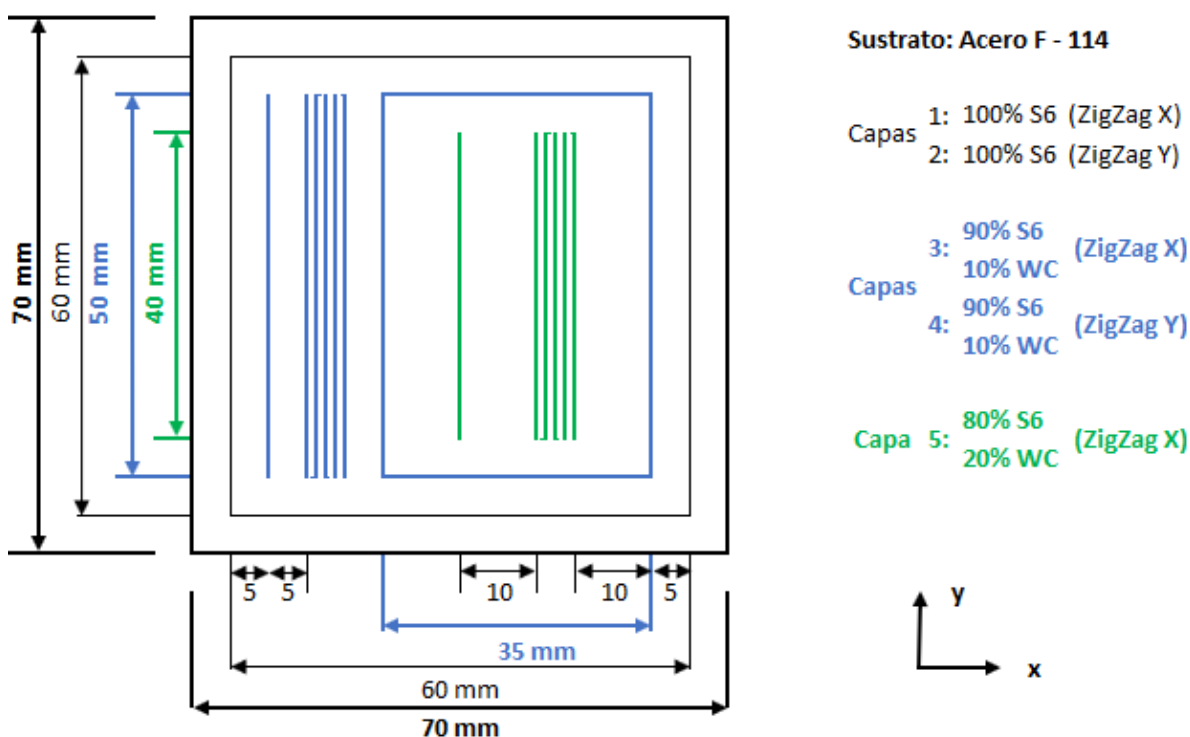


Ilustración 48. Esquema del ensayo de control

Para el análisis de la siguiente capa, la tercera, se realiza un aporte monocordón y un solape de cinco cordones sobre las primeras dos capas aportadas. El aporte monocordón se ejecuta a 5 mm del borde de los 60 mm de ancho de las primeras dos capas, con una longitud de 50 mm, para evitar como antes el sobrecalentamiento de la zona por el efecto borde y conseguir un aporte lo más homogéneo posible en su totalidad. El solape se efectúa a 5 mm del aporte monocordón y también con una longitud de 50 mm. El mayor interés que suscita esta tercera capa, es la adición del carburo de tungsteno en la composición del aporte realizado, una cantidad de un 10% en peso para esta capa.

El análisis de la quinta capa de un 20% de WC en peso en la composición del polvo aportado, requiere haber realizado las dos anteriores capas de un 10% en peso. Por ello, se realizan la tercera y la cuarta capa en la otra mitad del sustrato. Estas dos capas se aportan a 5 mm de los bordes y tendrán 35 mm de ancho y 50 mm de longitud. La quinta y última capa de esta prueba de control, se efectúa sobre la cuarta capa aportada y se procede de la misma manera que para el análisis de la tercera capa, un aporte monocordón y un solape de cinco cordones. La quinta capa, también dejara un margen de 10 mm con los bordes del ancho y entre ellos y, además, tendrán una longitud de 40 mm de largo con 5 mm de margen con los bordes.

Durante este experimento y los próximos que se realizarán, la estrategia de aporte utilizada será la misma. Las capas impares, es decir, las uno, tres, cinco, siete y nueve se aportarán realizando un zigzag en el eje Y; mientras que las capas pares, las dos, cuatro, seis, ocho y diez se aportarán realizando el zigzag en perpendicular, en el eje X. Y todos esos aportes en zigzag se realizarán con el 40% de solape mencionado anteriormente en este punto.

Ha de tenerse en consideración que el peso en polvo suministrado con el alimentador de polvo ira en aumento con la adición del carburo de tungsteno en la mezcla, y para paliar los problemas que pueda suponer este incremento de material, como la imposibilidad del láser para fundir todo el polvo aportado, se decide aumentar la potencia del láser a medida que incremente la cantidad de polvo, manteniendo en todo momento la relación potencia emitida por material aportado (véase Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros de ensayo de control

Capas	P [W]	F [mm/min]	rpms6[%]	rpmwc[%]	$\dot{m}_{tot}$ [g/min]
1 – 2	800	500	15,7	0	5,51
3 – 4	838	500	14,8	3,7	5,73
5	881	500	13,8	7	6,09

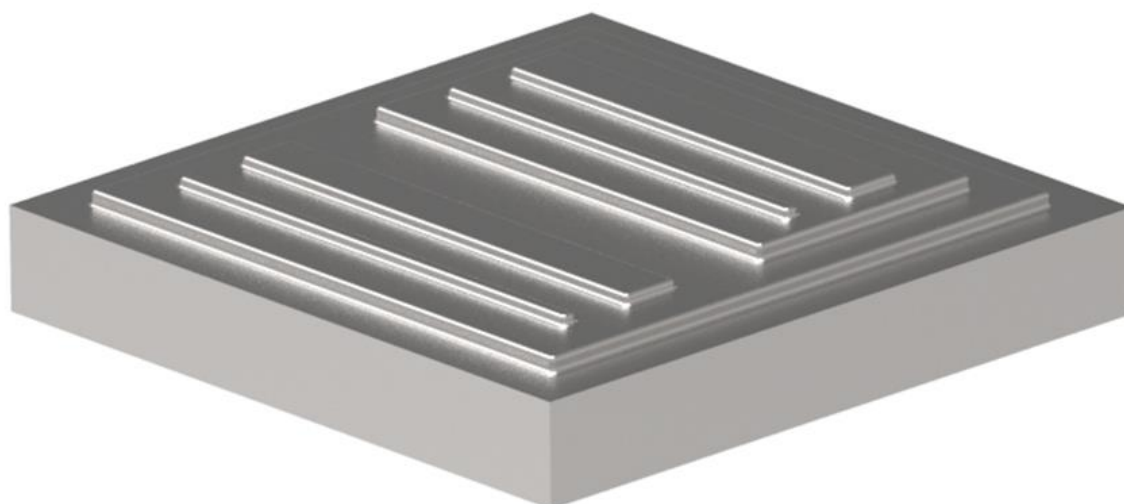


Ilustración 49. Figura 3D del ensayo de control diseñado

## 6.4. Obtención de resultados I

Como se ha mencionado al principio de este capítulo, esta prueba de control definirá si los parámetros utilizados para el aporte y las estrategias propuestas son válidas o defectuosas antes de realizar el recubrimiento final. Para ello, se analizan las dimensiones de los aportes monocordón y solapes, la distribución del carburo de tungsteno en la fusión, si existen grietas, si la dilución entre capas y con el sustrato es la adecuada y si existe algún defecto como podría ser una oxidación interna por falta de protección.

Con el fin de obtener los resultados requeridos para proseguir con el estudio, se procede a cortar la pieza por tres secciones distintas para comprobar la repetitividad de las muestras obtenidas y evitar singularidades (véase Ilustración 50). Dichos cortes se realizan en la zona estable del proceso con la sierra metalúrgica disponible en el taller, con un disco para metales duros.

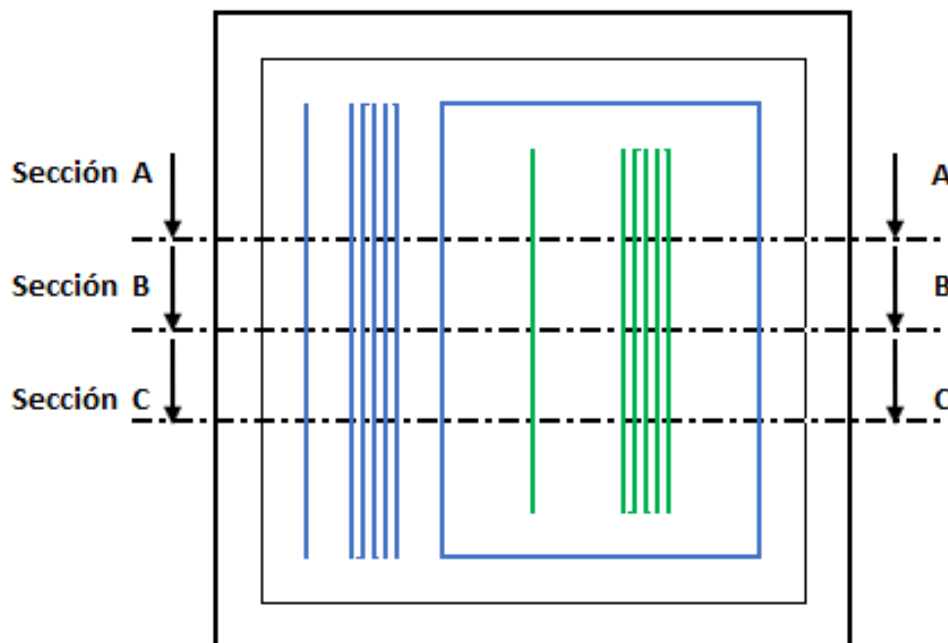


Ilustración 50. Esquema de secciones del ensayo de control

Una vez cortadas las distintas secciones, se procede al encapsulamiento. La máquina para encapsular probetas, comprime el trozo de metal de la sección a analizar junto con cuarenta mililitros de resina para encapsular y, posteriormente, los calienta para fundir la resina entorno a la pieza, dejando únicamente la superficie que se quiere analizar al descubierto. Para finalizar, la máquina refrigera la probeta mediante un intercambiador de agua y deja preparada para lijar y pulir.

El corte de la sierra metalúrgica deja marcas profundas en la superficie de la pieza y es necesario lijarla para conseguir un mejor acabado superficial. A la hora de lijar las probetas, se utiliza una pulidora metalográfica manual con cuatro diferentes lijas metálicas de diamante magnetizadas. Dichas lijas contendrán granos FEPA de 80, 220, 600 y 1200 respectivamente (véase Ilustración 51).

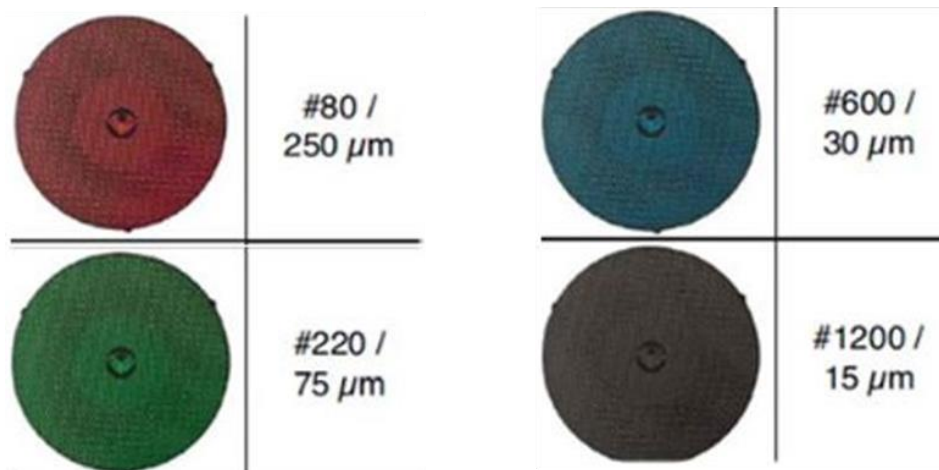


Ilustración 51. Lijas de pulidora metalográfica

Para el pulido por otra parte, se efectúa con la misma pulidora, pero con paños para la obtención de un mejor acabado. Se utilizan tres paños distintos y cada uno de ellos tiene su respectivo aerosol de diamantes para lograr un acabado espejo, sin ninguna raya visible a simple vista. El tamaño de los diamantes en suspensión de los diferentes aerosoles es de 9 µm, 3 µm y 1 µm respectivamente.

Tras conseguir dejar la superficie de las probetas a analizar con acabado espejo se realiza un ataque electrolítico sobre las superficies para diferenciar los límites de grano y el cambio de fase en las muestras. Las probetas se atacan electroquímicamente en un entorno de ácido oxálico mediante un voltaje impuesto desde un circuito externo con 20V y 1A durante un periodo de diez segundos, y así, en el posterior análisis del microscopio se distinguirán con mayor facilidad las diferencias entre los distintos materiales en la pieza.

La realización de este ataque se produce con las máximas garantías en seguridad posibles. Se utiliza máscara para respirar, guantes de látex y gafas protectoras para evitar cualquier inhalación o contacto con el ácido.

Para poder observar la macroestructura y microestructura de los ensayos, se utiliza "Microscopio confocal Leica DCM 3D" para la realización de unas fotos sobre las superficies de las probetas para el estudio de dichos aportes. Posteriormente, se generan unos archivos PDF en los que se realiza una medición de las dimensiones de los aportes. En estas mediciones se tendrán en cuenta la anchura del cordón o solape, su altura, la profundidad de dilución, los ángulos de mojado, la porosidad, grietas, faltas de llenado y la distribución del carburo de tungsteno.



## 6.5. Ensayo de recubrimiento I

Una vez realizado el análisis de todos los resultados de la prueba de control, se procede a la preparación del ensayo del recubrimiento. Si todos los resultados del ensayo de control han resultado ser correctos y realmente, no existe ningún defecto ni en los aportes, ni en los solapes de las distintas capas se procederá con lo planificado con anterioridad. Pero, de haber algún error, se modificarían los parámetros de aporte para la realización del recubrimiento con gradiente funcional y, de este modo, enmendar dicha falla.

Puesto que todos los resultados de la anterior prueba han sido satisfactorios, los parámetros con los que se pretendía realizar el recubrimiento se mantienen. Y tal como en el anterior ensayo, la potencia irá en aumento a medida que suba el peso del polvo aportado, manteniendo la relación energía emitida por cantidad de material suministrado.

Tabla 8. Parámetros de aporte de recubrimiento I

Capas	P [W]	F [mm/min]	rpm <sub>s6</sub> [%]	rpm <sub>wc</sub> [%]	$\dot{m}_{tot}$ [g/min]
1 – 2	800	500	15,7	0	5,51
3 – 4	838	500	14,8	3,7	5,73
5 – 6	881	500	13,8	7	6,09
7 – 8	928	500	12,7	10,7	6,37
9 – 10	980	500	11,5	14,8	6,77

En este ensayo, se realiza el recubrimiento de diez capas, el cual, gradualmente irá cambiando de composición. Sobre el sustrato se aportan dos capas que están compuestas íntegramente de Stellite 6 y cada dos capas, el porcentaje en peso del carburo de tungsteno aumentará un 10%. Esto continúa así hasta las últimas dos capas las cuales contienen un 40% de carburo de tungsteno en porcentaje de peso, consiguiendo así un recubrimiento con gradiente funcional que pueda satisfacer las necesidades de este proyecto (véase Tabla 8).

El sustrato está preparado tal como se ha mencionado en el apartado de la preparación previa. Dicho sustrato tiene unas dimensiones de 70 mm de largo, 70 mm de ancho y 10 mm de espesor, y se aportarán las diez capas anteriormente nombradas sobre el mismo.

Las capas a aportar tienen unas dimensiones de 20 mm de ancho por 50 mm de largo y se realizan en el centro del sustrato para evitar lo máximo posible el efecto borde. Respecto a la estrategia a seguir para la obtención de esas capas, se ha de mencionar que en las capas impares se realizarán zigzag en el eje X, los cuales son ocho repeticiones más el cordón final, lo cual hacen un solape de 17 cordones para la obtención de la capa, y en las capas pares se empleará el zigzag en el eje Y, con

veintitrés repeticiones más el cordón final, es decir, un solape de 47 cordones para completar la capa.

En la siguiente imagen se muestra claramente las dimensiones y la forma del recubrimiento que se realiza (véase Ilustración 52).

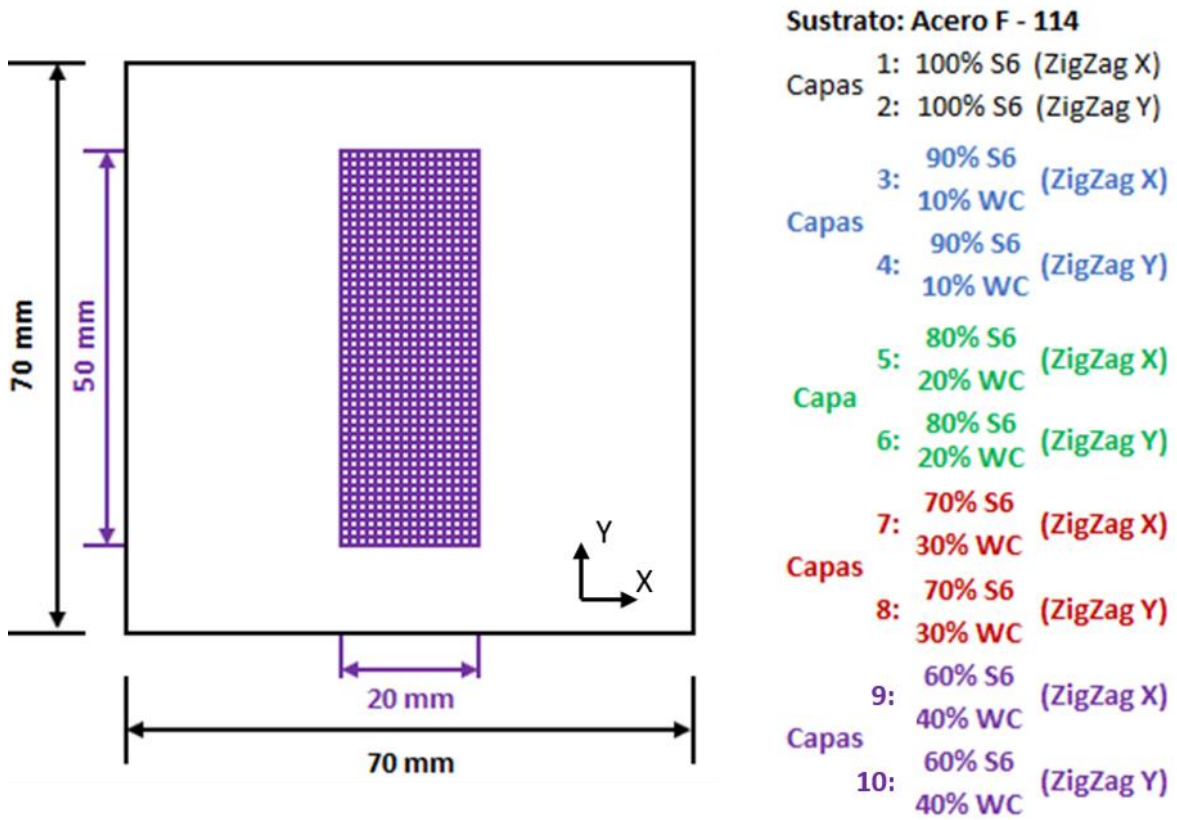


Ilustración 52. Esquema recubrimiento I

Para este experimento se instala un termopar en contacto con el lateral del sustrato, para poder llevar un control sobre la temperatura inicial del mismo antes de realizar cada aporte. De esta manera, se puede controlar que el sustrato no esté sobrecalentado antes de realizar el aporte.

Por otra parte, se graba en video todo el proceso, mediante una cámara de video a la que se le ha instalado un filtro de luz por motivo del láser. Esta grabación se realiza con el fin de observar en tiempo real lo que sucede dentro del centro de procesamiento láser durante la fabricación y poder registrar la fabricación en caso de que hubiese alguna incidencia en el proceso.

## 6.6. Obtención de resultados II

En ese apartado se tratará como estudiar el recubrimiento con gradiente funcional realizado con los parámetros seleccionados al inicio. Dado que este recubrimiento es excesivamente duro para cortar dicho material con la sierra metalúrgica, se emplea una máquina de electroerosión disponible en el taller de mecanizado de la universidad para cortar la pieza.

Tal y como al ensayo de control, se le realizan tres cortes al recubrimiento en la zona estable del proceso, estas secciones son perpendiculares a la dimensión longitudinal del recubrimiento de la pieza (véase Ilustración 53).

En este ensayo, se recopilan datos sobre la geometría de la sección del recubrimiento, la distribución del carburo de tungsteno en el Stellite 6, la interacción entre las distintas capas con diferente composición, la existencia de poros, faltas de llenado o incluso grietas, la dilución entre capas y con el sustrato o la existencia de diversos defectos en el recubrimiento.

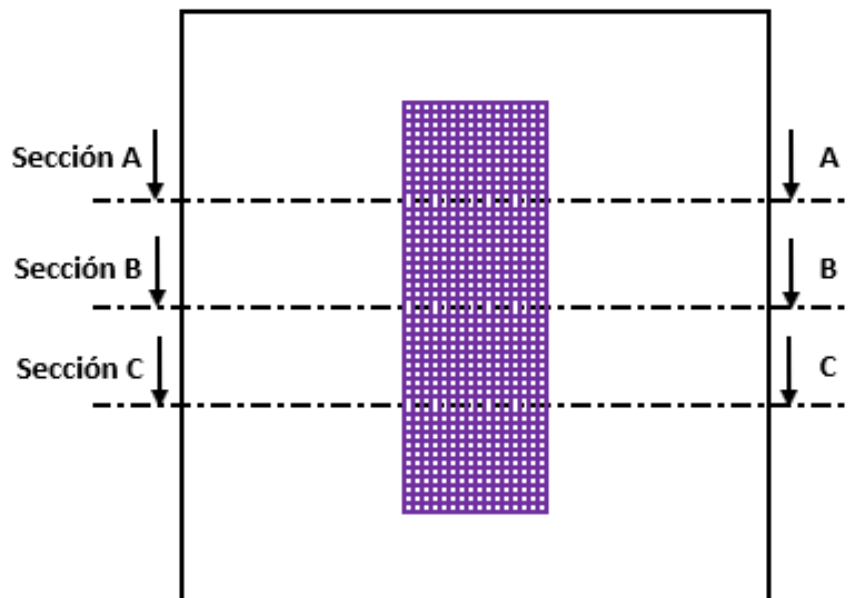


Ilustración 53. Esquema de secciones del recubrimiento I

Tal como se ha realizado en el ensayo de control, una vez adquiridos los tres cortes, se procede a encapsular las muestras. La encapsuladora deja las probetas listas para proceder con el siguiente paso.

Se procede con el lijado con la pulidora metalográfica manual y las cuatro diferentes lijas metálicas de diamante magnetizadas. Cada una de ellas contiene un tamaño de grano cada vez más pequeño para conseguir un acabado superficial mejor con cada uno de ellos, y unos surcos de menor tamaño.

Lo mismo pasa con el pulido de las probetas, se emplea la misma pulidora manual del taller, con los mismos tres paños y aerosoles utilizados en el ensayo de control. Con cada uno de ellos, la superficie irá tornándose más y más plana, porque con cada paño, la solución con diamante en suspensión que se utiliza es de menor diámetro y cada uno de ellos irá dejando menores surcos en la superficie de la pieza, logrando así el acabado

espejo. Es decir, el rayado de la superficie de la muestra, termina por ser una superficie lisa en la cual, a simple vista, no se puede observar marca alguna.

Una vez conseguido el acabado espejo de las muestras, se emplea el ataque electrolítico en un entorno de ácido oxálico sobre las superficies para diferenciar las distintas fases en el recubrimiento a 20V y 1A durante diez segundos, para atacar así el aporte de la muestra.

Posteriormente se realiza el estudio de la macro y microestructura de la muestra, para ello se utiliza "Microscopio confocal Leica DCM 3D" y se recogen las mediciones de la estructura, distribución del carburo de tungsteno, porosidades y defectos en el recubrimiento.

Finalmente, para acabar con la recopilación de datos, se realizan análisis de microdurezas. Para realizar este estudio se utiliza un durómetro "Future-tech microhardness tester FM-800" disponible en el taller de metrología. Gracias a este dispositivo se pueden realizar análisis de durezas en puntos concretos de la superficie del recubrimiento, midiendo las dimensiones de los surcos dejados por una punta con una fuerza determinada ejercida por la máquina. Mediante el visor del dispositivo es posible medir las diagonales realizadas por dicha punta, y la máquina con esas medidas realiza el cálculo de la dureza del punto de la superficie.

De este análisis, interesa saber el incremento de la dureza desde el sustrato hasta la superficie del recubrimiento. Para obtener dichos resultados, se realizan dos columnas de pruebas en cada probeta, columnas que irán perpendicularmente a la superficie de la probeta. Las pruebas de estas columnas estarán separadas por 0,2 mm unas de otras y se realizarán en una vertical donde no haya defectos como grietas.

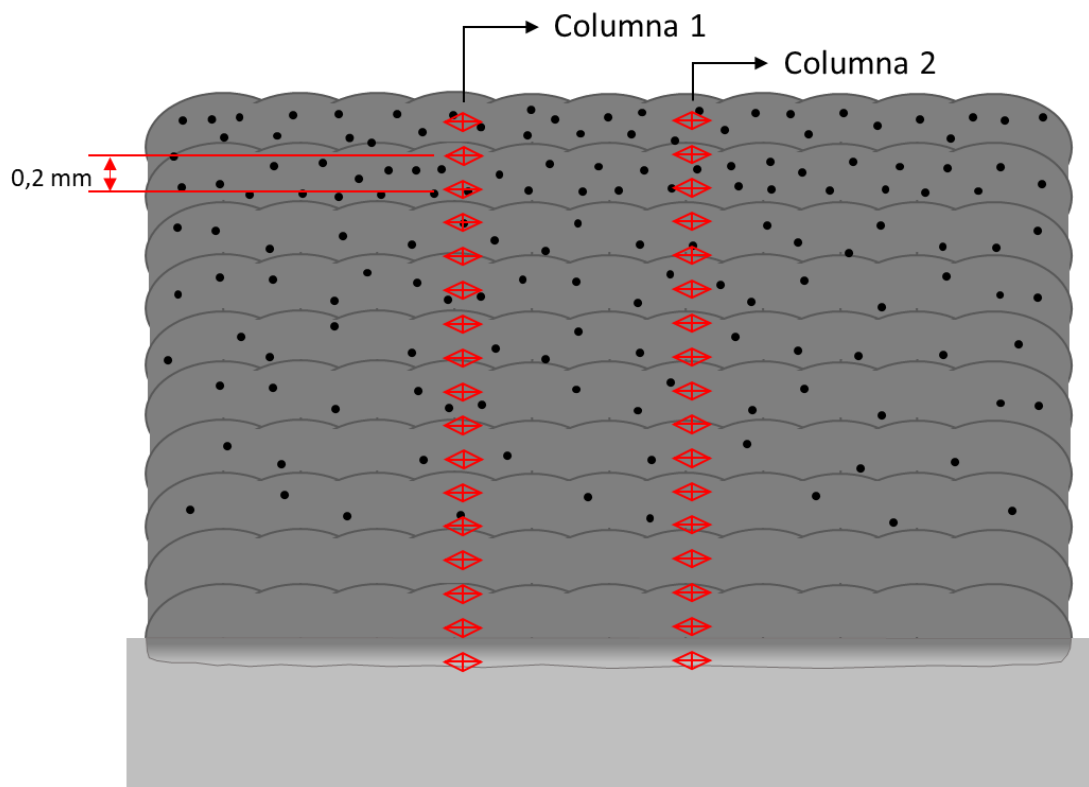


Ilustración 54. Estudio de microdurezas

## 6.7. Planificación II

Tras observar los resultados obtenidos en el ensayo del recubrimiento y las grietas que contiene en todas las muestras, se decide tratar de determinar el porqué de la aparición de dichas grietas. Además de buscar la razón de generación de grietas, también es necesaria una forma de lidiar con ellas para poder eliminarlas del recubrimiento del sustrato buscando los parámetros de aporte adecuados para este tipo de materiales y obtener los resultados deseados.

Para conseguir los objetivos impuestos se decide que la mejor manera de lograr tanto la razón de la aparición de grietas como la obtención de los parámetros óptimos para un recubrimiento exitoso es la realización de una caracterización del Stellite 6 sobre el sustrato de acero laminado F – 114.

Esta caracterización del Stellite 6 se realiza mediante un DOE, un diseño de experimentos, el cual se detallará en el próximo punto de este documento. Con este diseño de experimentos, una vez hechos los aportes, haber obtenido sus resultados y haberlos tratado en el ordenador, se pretende haber obtenido los parámetros indicados para la fabricación de un recubrimiento exitoso.

Finalmente, con todos los datos y parámetros necesarios para la ejecución del recubrimiento con gradiente funcional definitivo, se procederá a la fabricación del mismo para la recopilación de datos esenciales con el fin de saber si el recubrimiento realizado contiene las propiedades necesarias para satisfacer las necesidades de los útiles de los procesos de estampación en caliente.

Para la recopilación de todos estos resultados, se utilizarán, naturalmente, todos los procedimientos analíticos seguidos hasta ahora. Se obtendrán fotos de las secciones de dicho recubrimiento, se realizarán mediciones de la geometría, de la disposición del carburo de tungsteno y análisis de microdurezas.

Una vez, concluidas las pruebas y habiendo obtenido todos los resultados del presente estudio, se procederá al análisis y discusión de los mismos, para concluir el estudio con unos resultados que lo respalden.

## 6.8. DOE

Con la aparición de tantas grietas en el último ensayo, se encuentra la necesidad de averiguar la razón por la que surgen dichas grietas. Pero, como además de ello, es necesario encontrar unos parámetros de aporte que eviten estos agrietamientos y sean adecuados para la fabricación del recubrimiento de gradiente funcional de este trabajo fin de máster.

Por esa razón, se ha llegado a la conclusión de que la realización de un diseño de experimentos es la mejor alternativa para la ejecución del proyecto. Para llevar a cabo este DOE, se utiliza el *software* "Design Expert 12" detallado en el estado del arte de este trabajo.

Este programa, es capaz de devolver los resultados de los experimentos en una superficie capaz de abarcar parámetros donde no se ha actuado gracias a metodología matemática. Gracias a estos resultados es posible la optimización de los procesos de aporte por láser, siendo una herramienta tremendamente versátil.

Investigando la bibliografía disponible de este tipo de experimentos para procesos LMD, y teniendo en cuenta la información disponible hasta ahora, se decide utilizar los parámetros de aporte utilizados para la realización del recubrimiento agrietado como punto central del próximo experimento. Una vez fijado el punto central, se deciden unos límites a estudiar para cada parámetro y cuantas veces se realizará el análisis del punto central (cuatro en este caso), además de definir los resultados que saldrán de dicho experimento y sus unidades.

Los parámetros variables para esta optimización son la potencia del láser, el avance de la boquilla respecto al sustrato y la cantidad de polvo a suministrar al entorno del aporte. Al haber terminado con los preparativos preliminares, el programa emite los parámetros variables con los que trabajar en la máquina láser para poder graficar la repuestas posteriormente (véase Tabla 9).

Tabla 9. Parámetros de ensayo DOE

Ensayo	$\dot{m}_{s6}$ [g/min]	P [W]	F [mm/min]
1	2,98	800	500
2	4	700	400
3	4	700	600
4	4	900	400
5	4	900	600
6	5,5	631,82	500
7	5,5	800	331,82
8	5,5	800	500

9	5,5	800	500
10	5,5	800	500
11	5,5	800	500
12	5,5	800	668,18
13	5,5	968,18	500
14	7	700	400
15	7	700	600
16	7	900	400
17	7	900	600
18	8,02	800	500

Para la realización de estos dieciocho ensayos del DOE, es necesario calcular como en la preparación previa a los anteriores experimentos, las revoluciones a las que virará el disco del alimentador de polvo para el suministro del polvo de Stellite 6 con el fin de obtener los flujos detallados en la tabla. Como estos nuevos flujos son totalmente distintos se vuelve a realizar el ensayo de obtención de revoluciones al completo, es decir, se deja el alimentador de polvo durante un periodo de dos minutos suministrando polvo a un recipiente que se pesa posteriormente para verificar que la cantidad emanada era la correcta. Este proceso se realiza dos veces para asegurar la repetitividad de los ensayos.

En la siguiente tabla se pueden observar la velocidad de giro que han de llevar los discos del alimentador para lograr el flujo deseado y las masas resultantes del ensayo (véase Tabla 10).

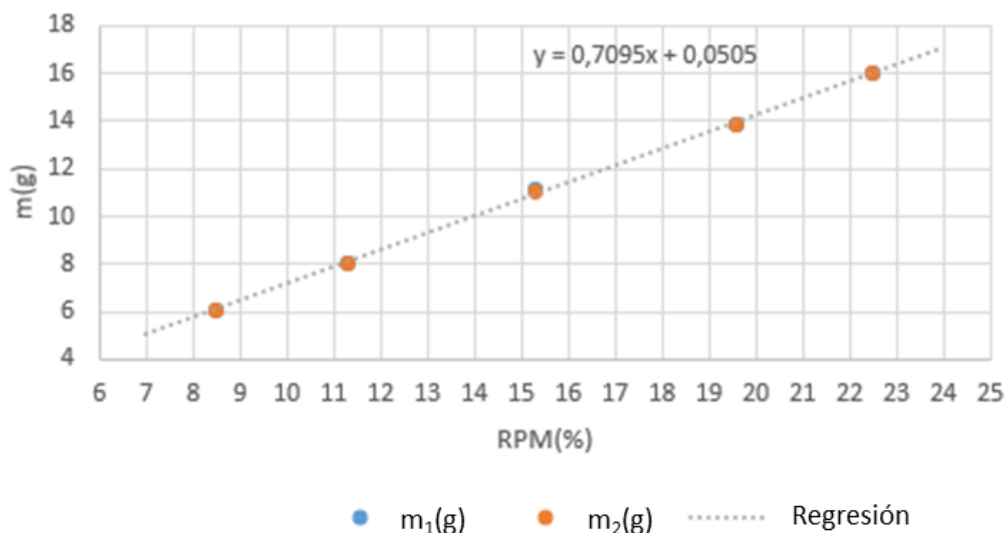
Tabla 10. Cálculo de revoluciones de alimentador de polvo II

$\dot{m}_{s6}$ [g/min]	Gas [NCPL]	t [min]	rpm <sub>s6</sub> [%]	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]
2,98	4,5	2	8,5	6,03	6,04
4	4,5	2	11,3	8,01	8,04
5,5	4,5	2	15,3	11,16	11,03
7	4,5	2	19,6	13,84	13,88
8,02	4,5	2	22,5	16,01	16



Gracias a estos datos es posible verificar la linealidad del alimentador de polvo, realizando una regresión de los datos en el programa "Excel", además de asegurar que las velocidades de giro obtenidas fuesen las correctas (véase Gráfica 1).

Gráfica 1. Linealidad del alimentador de polvo



Tras tener los parámetros para la realización del experimento preparados, tan solo falta diseñar como se realizará el ensayo. Una vez más, el ensayo se realiza sobre un sustrato de acero laminado F – 114 de 70 mm de ancho, 70 mm de largo y 10 mm de espesor. Los cordones tendrán una separación mínima de 5 mm entre sí en paralelo y una longitud de 30 mm cada una de ellas (véase Ilustración 55).

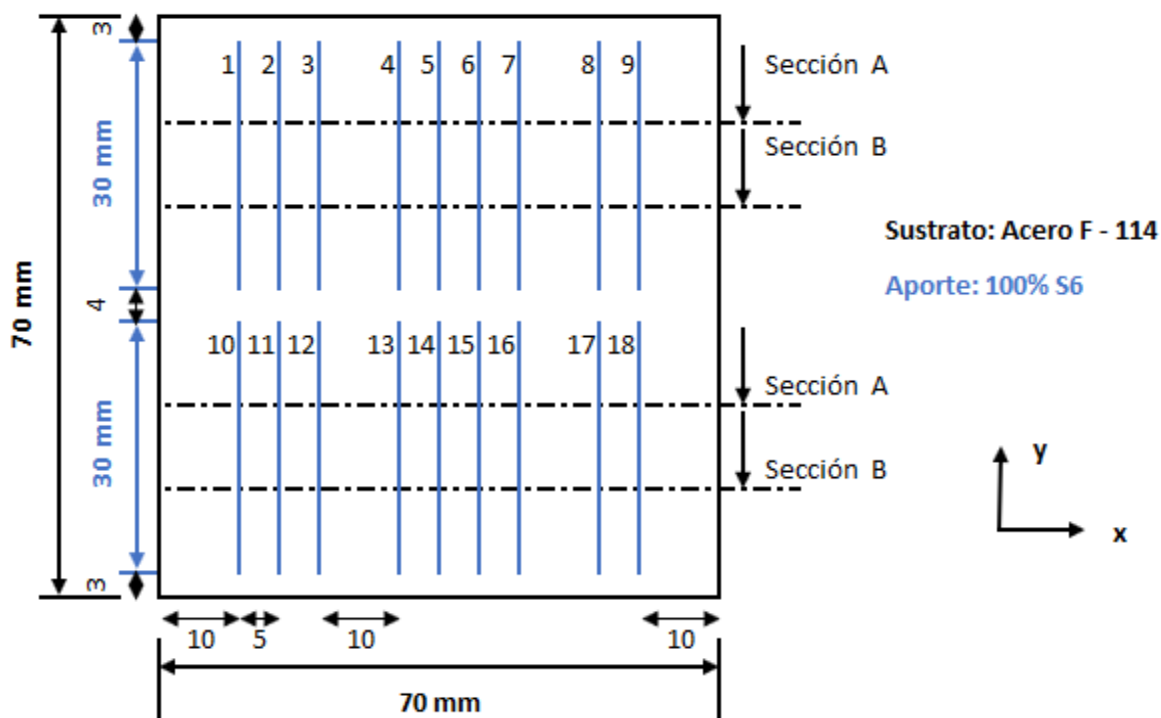


Ilustración 55. Esquema del DOE

Se debe tener especial cuidado en estos ensayos, puesto que, la mayoría de las variables cambian de aporte a aporte. Por otra parte, se instala el termopar en el lateral del sustrato para evitar que el acero este excesivamente caliente en el momento previo a cada aporte.

El sustrato con los dieciocho ensayos es cortado por las dos secciones ilustradas en el croquis para la obtención de los resultados de dichos aportes. La separación de los aportes sobre el sustrato ha sido de 3-4-2 para poder diferenciar las probetas mejor posteriormente.

En esta ocasión, se utiliza la sierra metalúrgica para realizar los cortes y separar las distintas muestras listas para encapsular. Las probetas se encapsulan mediante el método habitual con resina en la encapsuladora y, posteriormente, se lijan y pulen en la pulidora metalográfica mencionada en anteriores puntos para lograr un acabado espejo en las superficies.

El ataque electrolítico se realiza una vez más en un entorno de ácido oxálico, a 20 V de tensión y 1 A de intensidad durante diez segundos. Una vez son visibles las distintas fases de la muestra, se procede al análisis con el microscopio.

En el análisis de la superficie de las muestras, se realizan fotos de dichas secciones con el objetivo de diez aumentos, porque interesa mayormente la geometría del aporte, la dilución, las porosidades o defectos que se hayan podido generar, como faltas de llenado. Mediante el programa "Leica map" se obtienen los datos geométricos del aporte, es decir, la altura, el ancho de cordón, los ángulos de mojado y la profundidad, y de dichos datos se obtiene también la dilución (véase Ilustración 56).

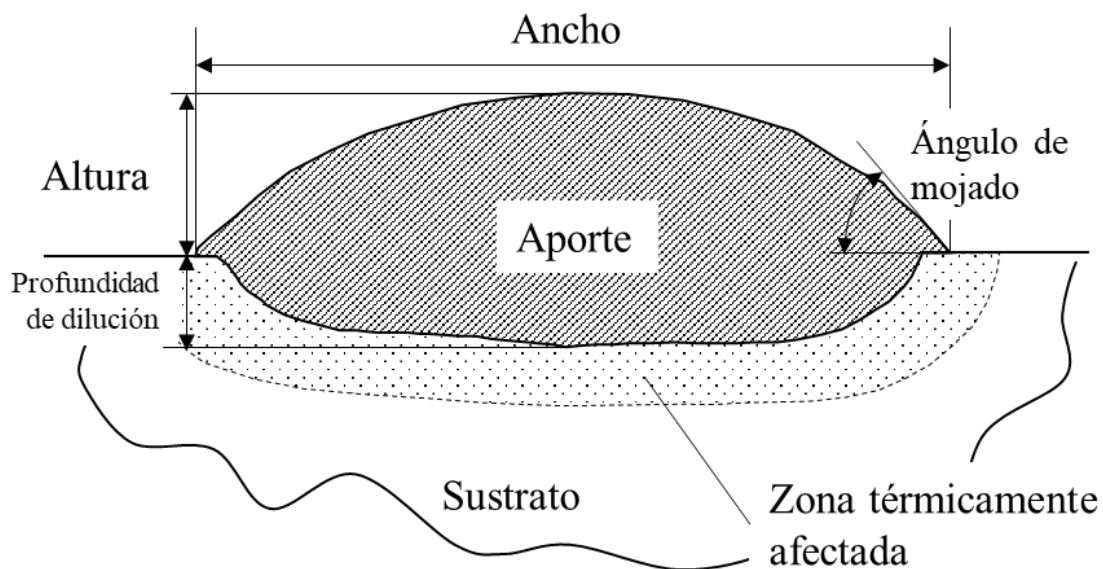


Ilustración 56. Características del aporte

Después de lograr todos los datos de las características de los diferentes ensayos y apuntar todos los defectos que puedan tener los cordones, se registran en el programa "Design Expert 12" para que pueda generar los cálculos de los gráficos necesarios mediante métodos matemáticos.

Para realizar los gráficos del programa, se aplica un método lineal para evitar que las parábolas generen curvas fuera del ámbito de funcionamiento, a pesar de que estas curvas se puedan asemejar mejor a la situación real dentro del ámbito de aplicación. Por otra parte, se decide que se desea un gráfico de tres ejes en el que no se dependa de una cuarta variable como podrían ser en este caso los tres ejes, la deseabilidad del cordón, el avance de la boquilla respecto al sustrato y el flujo de polvo suministrado dependiendo de la potencia del haz láser. Por lo que se decide que los dos ejes horizontales sean la potencia del láser por unidad de medida y el flujo de polvo suministrado por unidad de medida, para no depender del factor tiempo (véase Tabla 11).

Tabla 11. Datos de los ensayos en los gráficos de Design Expert 12

Ensayo	P/F [J/mm]	$\dot{m}_{ss}/F$ [mg/mm]
1	96	5,95
2	105	10
3	70	6,67
4	135	10
5	90	6,67
6	75,82	11
7	144,66	16,58
8	96	11
9	96	11
10	96	11
11	96	11
12	71,84	8,23
13	116,18	11
14	105	17,50
15	70	11,67
16	135	17,50
17	90	11,67
18	96	16,05

Tras detallar detenidamente todas las variables de entrada, las características de los aportes y haber elegido el método adecuado para el cálculo idóneo para los resultados, se especifican los valores con los que el cordón se considera deseable o adecuado en términos metalúrgicos.

Los parámetros de fabricación que se utilizan para determinar si los cordones son adecuados o no y cuál es el punto óptimo de aplicación, son los que se detallan a continuación:

- **Altura / Ancho de cordón:** Esta fracción tiene relación directa con el ángulo de mojado, y al igual que en el ángulo de mojado se busca un ángulo de  $45^\circ$  para un parámetro óptimo, en la división Altura / Ancho de cordón se busca que esté entre las fracciones  $1/5$  y  $1/3$ .
- **Dilución:** La dilución es un parámetro que relaciona la altura y la profundidad del aporte, señalando el porcentaje del aporte que está fuera del sustrato. Por lo que el cálculo de dicho parámetro es  $\text{Altura} / (\text{Altura} + \text{Profundidad})$  y el considerado punto óptimo es un tercio de dilución.
- **Falta de llenado:** Estas son un defecto de fabricación, son la falta de material que se encuentra en la sección del aporte y no se pueden permitir en las mismas ya que constituyen una falta metalúrgica grave para las piezas fabricadas mediante estos métodos de LMD. Por otra parte, estas faltas de llenado pueden ser meramente superficiales y/o no estar en todo el aporte solo apreciarse en una de las muestras. Por esa razón, estas faltas de llenado se cuantifican y en vez de definir las como si y no, se anotan por grado de gravedad siendo 0 inadmisibles para el aporte y 1 un cordón sin ninguna falta de llenado ni defecto alguno.

Finalmente, después de definir las características ideales de un cordón, se obtienen las gráficas necesarias para optimizar los parámetros de fabricación y finalizar con la caracterización del Stellite 6.

Estas gráficas se analizan detenidamente para comparar las imágenes de las muestras con el punto que se encuentran en el gráfico y comprobar cuán fiables y efectivas son. Y de esta manera, poder determinar si cumplen con los objetivos fijados para lograr el propósito para el que fue creado.

## 6.9. Ensayo de recubrimiento II

Una vez estando definidos los parámetros ideales de aporte del Stellite 6, se puede proceder a repetir el ensayo del recubrimiento FGM. Tal como en el anterior ensayo, el aporte se realiza sobre un sustrato con la superficie rectificada de 70 x 70 mm de ancho y alto y 10 mm de espesor. El revestimiento se realiza lo más centrado posible para tratar de minimizar el efecto borde, y las dimensiones y composiciones de las diez capas serán idénticas al anterior experimento, 50 x 20 mm de alto y ancho respectivamente y diez capas en las que el porcentaje del carburo de tungsteno incrementa gradualmente hasta un 40%.

Tabla 12. Parámetros de aporte del recubrimiento II

Capas	P [W]	F [mm/min]	$\dot{m}_{s6}$ [g/min]	$\dot{m}_{wc}$ [g/min]	rpm <sub>s6</sub> [%]	rpm <sub>wc</sub> [%]
1 – 2	700	400	4	0	11,3	0
3 – 4	700	400	3,77	0,42	10,7	2,3
5 – 6	700	400	3,52	0,88	10	4,9
7 – 8	700	400	3,25	1,39	9,2	7,7
9 – 10	700	400	2,94	1,96	8,3	10,8

En este experimento la potencia se mantiene constante en el punto óptimo para la soldadura del Stellite 6, a pesar del leve aumento de peso que sufre el flujo másico de polvo. Por otra parte, la estrategia a seguir es completamente igual a la realizada en el anterior recubrimiento, un solape de 17 cordones de zigzag en el eje X en las capas impares y un solape de 47 cordones de zigzag en el eje Y para las capas pares, completando así el revestimiento de 50 x 20 mm.

Para la realización del experimento se instala el termopar en la máquina. El termopar se coloca en contacto con el sustrato para controlar que no esté sobrecalentado antes de realizar el aporte.

También se instala la cámara de video para observar y grabar lo que sucede en el interior del centro de procesamiento láser en tiempo real por si hubiese alguna incidencia durante el proceso LMD.

### 6.10. Obtención de resultados III

Para finalizar con la realización de experimentos y la obtención de resultados de los mismos se estudia el recubrimiento con gradiente funcional. Para ello ha de cortarse la pieza, y puesto que la dureza superficial es excesivamente alta, se corta mediante la máquina de electroerosión del taller de mecanizado.

En este ensayo, se pretenden analizar los mismos resultados que en el anterior recubrimiento, es decir, la geometría del recubrimiento, la distribución del carburo de tungsteno en el Stellite 6, la interacción entre las distintas capas con diferente composición, porosidades, faltas de llenado, grietas y diferentes defectos que hayan podido surgir durante la fabricación.

Se secciona el recubrimiento por tres partes distintas en la zona estable del proceso y tras realizar los cortes, se encapsula, lija y pule la probeta hasta lograr el acabado espejo en la superficie de la sección.

Al trabajar con el mismo material todo el rato, el ataque que se realiza es el mismo siempre, un ataque electrolítico a 20V y 1A durante diez segundos en un entorno de ácido oxálico.

A posteriori, se estudian las probetas mediante el "Microscopio confocal Leica DCM 3D" tomando fotos y realizando mediciones.



Ilustración 57. Microscopio Confocal Leica DCM 3D





## 7. Resultados

Durante los próximos apartados de este séptimo punto se presentarán todos los resultados experimentales obtenidos y observaciones realizadas en los diversos ensayos de este proyecto.

Este apartado de resultados lo abarca todo comenzando desde los obtenidos en el ensayo de control, continuando con los posteriores resultados del primer recubrimiento fabricado y el diseño de experimentos realizado, hasta los resultados logrados en el recubrimiento final.

Con todos estos resultados se podrán desarrollar finalmente las conclusiones de este estudio sobre la fabricación de recubrimientos FGM.

### 7.1. Resultados del ensayo de control

En este apartado se pretende saber únicamente si la interacción del material duro en el aporte genera algún tipo de problema o defecto, como grietas, con los parámetros utilizados desde un inicio para el recubrimiento, comprometiendo la calidad metalúrgica del material. Y de ser así, poder identificar en que capa se comienzan a generar dichos defectos.

Para ello se estudian cuatro muestras distintas: el monocordón y el solape de la tercera capa y el monocordón y solape de la quinta capa. Todas ellas se han cortado por tres secciones distintas, A, B y C para evitar tomar dato de singularidades que puedan generarse.

Las secciones realizadas no muestran a simple vista defectos aparentes como grietas en las diferentes capas que puedan comprometer seriamente la calidad de la unión y funcionalidad o desunión entre sustrato y material de aporte, pudiendo observar una correcta soldabilidad entre ellas y una buena dispersión del carburo de tungsteno en las primeras capas del experimento.

Al no observarse problema alguno, se seguirá adelante con los parámetros de entrada preseleccionados mediante el estudio bibliográfico realizado.

## 7.2. Resultados del Recubrimiento I

En este experimento se desea saber si el recubrimiento FGM cumple con las exigencias de los procesos de estampación en caliente o si ha de mejorar los parámetros de fabricación para lograr dichas metas. En este recubrimiento de diez capas fabricado mediante LMD se analiza la calidad metalúrgica.

Las tres secciones muestran, en las imágenes obtenidas por el microscopio, un aumento acorde con lo previsto de carburo de tungsteno en el revestimiento. Esto provoca en la transición de propiedades desde la base del sustrato hasta la superficie.

Pero como se pueden observar a simple vista, existen numerosas grietas las cuales comienzan desde la superficie y continúan hasta inferiores capas, las cuales son inviables para la fabricación de los troqueles. Estas grietas son generadas por las tensiones residuales resultantes de la fabricación del recubrimiento y las partículas de carburo de tungsteno aparecen como concentradores de tensiones.

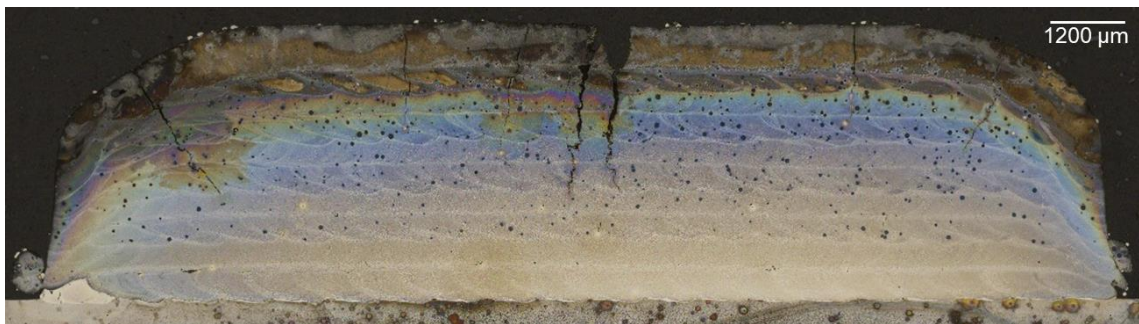


Ilustración 58. Sección Recubrimiento I

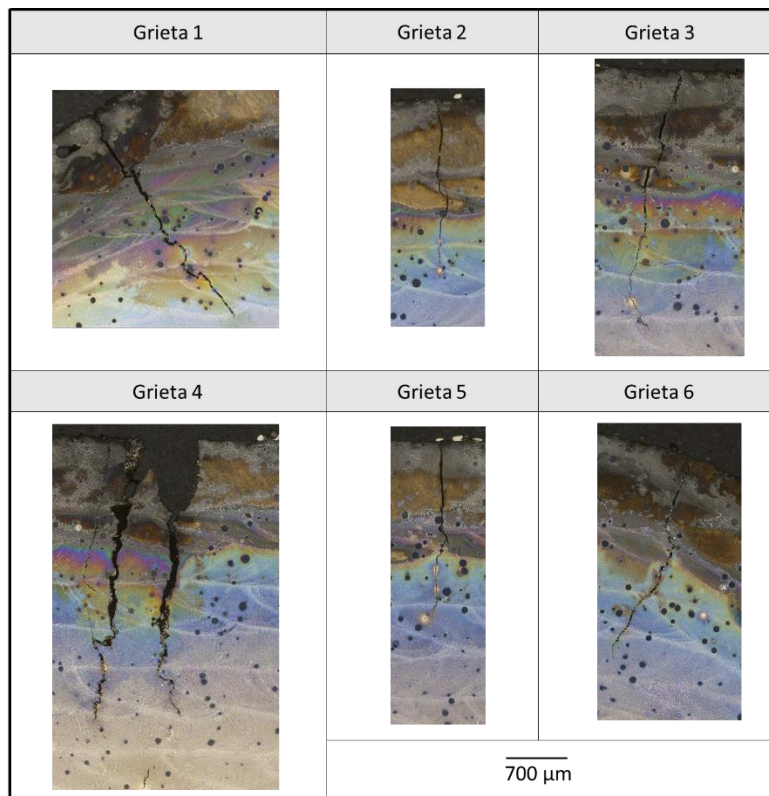


Ilustración 59. Grietas Recubrimiento I

Para finalizar con el análisis de ese recubrimiento se obtienen las microdurezas de las dos columnas verticales, en la que hay una muestra cada 0,2 mm. La dureza Vickers que se muestra en la siguiente tabla es la media obtenida entre las dos columnas de una de las secciones, siendo las otras secciones dos similares a las mediciones que a continuación se observan (véase Tabla 13).

Tabla 13. Microdurezas de recubrimiento I

Medida	y [mm]	Dureza [HV]	Medida	y [mm]	Dureza [HV]
1	- 0,8	173,62	17	2,4	448,07
2	- 0,6	186,30	18	2,6	395,41
3	- 0,4	203,72	19	2,8	430,38
4	- 0,2	217,07	20	3,0	448,88
5	0,0	293,67	21	3,2	506,36
6	0,2	332,31	22	3,4	539,28
7	0,4	333,57	23	3,6	541,40
8	0,6	333,32	24	3,8	611,46
9	0,8	332,28	25	4,0	541,81
10	1,0	343,79	26	4,2	575,90
11	1,2	340,29	27	4,4	598,60
12	1,4	373,16	28	4,6	491,65
13	1,6	390,16	29	4,8	696,90
14	1,8	378,60	30	5,0	633,14
15	2,0	389,96	31	5,2	674,92
16	2,2	404,50	32	5,4	647,93

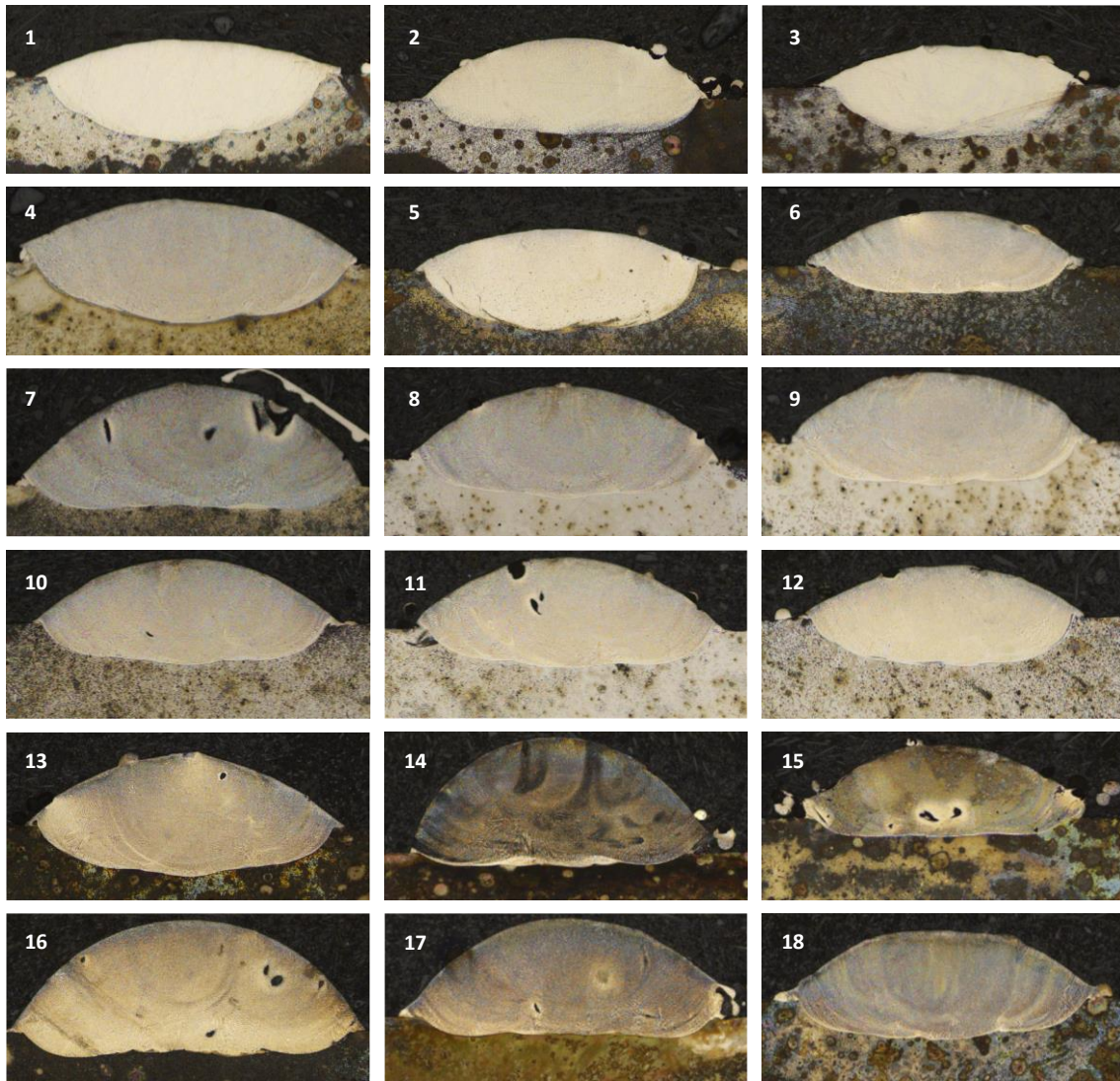
Como se puede observar, la dureza en general incrementa de una forma regular a medida que se aleja del sustrato y acerca a la superficie. Existen pequeñas variaciones en las que la próxima medida es menor que la anterior, pero esto se debe a que alguna de las medidas está demasiado cerca de alguna partícula de carburo de tungsteno e incrementa el valor de la misma.

A pesar de que este recubrimiento sea inservible para los procesos de estampación dado que se ha agrietado por múltiples lugares, el incremento gradual de este experimento es lo que se busca en el revestimiento con gradiente funcional. Además, la dureza superficial obtenida se asemeja a la dureza necesaria para la minimización del desgaste por abrasión en los troqueles.

Para lograr el recubrimiento deseado es necesario tratar de identificar posibles causas del agrietamiento, para poder mejorar los parámetros de aporte idóneos en la fabricación del revestimiento FGM. Para ello, se vuelve a planificar el proyecto comenzando con la caracterización del Stellite 6 mediante un diseño de experimentos.

### 7.3. Resultados del DOE

Como se ha explicado en la metodología se ha decidido realizar una caracterización del Stellite 6 para tratar descubrir el porqué de la generación de grietas y tratar de optimizar los parámetros, todo esto mediante un diseño de experimentos con el programa "Design expert 12". Este programa pidió la realización de 18 cordones con distintos parámetros para poder graficar el punto ideal de aporte y, los resultados de las secciones realizadas son las que siguen (tan solo se muestra una sección por cordón).



150  $\mu\text{m}$

Ilustración 60. Cordones de caracterización del Stellite 6

Estas imágenes se han obtenido gracias al microscopio confocal. En este análisis se han logrado las medidas de altura, profundidad de dilución, ancho de cordón, los ángulos de mojado y anotar las faltas de llenado si las hubiere. Estas mediciones varían dependiendo de los parámetros aplicados en su fabricación (véase Ilustración 60).

En la próxima tabla se analiza la influencia de los distintos parámetros de entrada como potencia, caudal másico de polvo y avance. En la tabla se muestran las medidas medias obtenidas en las dos secciones de cada cordón y, en el caso de las faltas de llenado, si una de las secciones tuviese alguna, se cuantifica la sección con mayores fallas.

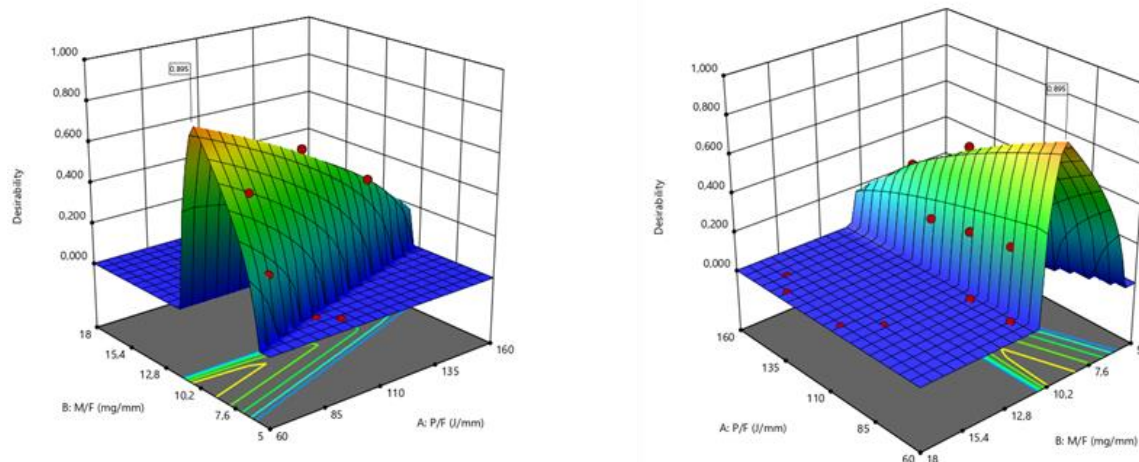


Tabla 14. Geometría de cordones

Ensayo	alto [mm]	ancho [mm]	profund. [mm]	ángulo moj. [°]	dilución [%]	Falta de llenado
1	0,190	1,531	0,348	25,816	0,647	1
2	0,317	1,485	0,192	39,596	0,377	1
3	0,217	1,352	0,273	28,361	0,558	1
4	0,317	1,680	0,323	31,889	0,504	1
5	0,222	1,556	0,333	30,165	0,599	1
6	0,278	1,375	0,140	39,223	0,335	0,2
7	0,520	1,748	0,127	52,922	0,196	0
8	0,364	1,602	0,203	46,370	0,359	1
9	0,328	1,566	0,233	42,901	0,417	1
10	0,344	1,563	0,217	38,290	0,386	0,3
11	0,358	1,059	0,198	46,529	0,356	0,3
12	0,269	1,471	0,255	34,369	0,486	1
13	0,351	1,663	0,265	37,673	0,431	0,7
14	0,592	1,566	0,078	65,551	0,116	0
15	0,363	1,417	0,113	44,363	0,237	0
16	0,548	1,793	0,139	53,311	0,202	0
17	0,499	1,622	0,117	53,059	0,190	0
18	0,371	1,625	0,196	37,499	0,346	0

Una vez insertados todos los datos en el programa, elegida la linealidad de las gráficas y parametrizado el objetivo final, el cordón ideal, el programa es capaz de graficar sobre los parámetros de aporte iniciales una figura de una superficie en tres dimensiones que determina la zona ideal de aporte y cuanto se acerca a ese cordón previamente idealizado.

Gráfica 2. Caracterización del Stellite 6



El gráfico, al ser calculado de una forma lineal, continua de manera ascendente hacia la máxima deseabilidad del cordón en una zona fuera de los límites de fabricación de la máquina. Pero esta tendencia ascendente es un error, puesto que sigue creciendo en base a los ensayos realizados y no se conoce donde empezará a decrecer exactamente por falta de ensayos en ese punto de aplicación (véase Gráfica 2).

Como se puede observar en el gráfico, varios ensayos quedan fuera del entorno deseable de aporte, tanto por una parte como por la otra. En la zona con una relación de M/F mayor a 11,6 se encuentran seis ensayos descartado por faltas de llenado que no se pueden permitir en la fabricación del recubrimiento. Sin embargo, por la zona de menor flujo másico por unidad de medida los ensayos se descartan por no cumplir adecuadamente la relación entre altura y acho de cordón y dilución del material en el sustrato. A pesar de estos descartes, la información que todos estos ensayos proporcionan es indispensable para la generación del gráfico.

Teniendo en cuenta esto, del gráfico se puede deducir que, si se aumenta la potencia del láser manteniendo tanto avance como flujo másico de polvo, el cordón perderá altura y ganará anchura perjudicando a la geometría a partir de cierto punto. Esto es lógico teniendo en cuenta que se aporta mayor cantidad de energía sobre el mismo punto elevando la temperatura. De aumentar el flujo de polvo, sin embargo, llegará un punto en el que el láser no es capaz de fundir todo el polvo aportado sobre la zona o solidificándose antes de expulsar todo el gas del cordón aportado. De esta manera es como surgen las faltas de llenado.

Puesto que los parámetros de inicio del ensayo número dos son el que mejor resultado real da en el gráfico y como cumple con todas las características necesarias para ser un buen cordón para el aporte, a pesar de no ser el ideal, se seleccionan esas variables de fabricación para realizar el recubrimiento final. Es decir, los parámetros de aporte base para el Stellite 6 serán  $P=700$  W,  $F=400$  mm/min y  $\dot{m}_{S6}=4$  g/min durante la fabricación del recubrimiento.

Por otra parte, se ha podido determinar que los anteriores parámetros de fabricación del recubrimiento originaban faltas de llenado en el material aportado, siendo un defecto grave para la calidad el cordón. Estas faltas de llenado son parte de la razón del agrietamiento durante el enfriamiento del recubrimiento con gradiente funcional.



## 7.4. Resultados del Recubrimiento II

La conclusión del proceso de fabricación de materiales con gradiente funcional por LMD pasa por la necesidad de la evaluación de la calidad metalúrgica del recubrimiento. En este último experimento se pretende obtener un recubrimiento con unas características adecuadas para la estampación en caliente en geometría, la distribución del carburo de tungsteno y dilución del material aportado. Además, se quieren observar las mejoras logradas respecto a la anterior fabricación del recubrimiento y los defectos que hayan podido surgir en este ensayo mediante el microscopio confocal Leica, disponible en el taller de metrología.

La siguiente imagen muestra una de las secciones del recubrimiento con gradiente funcional fabricado (véase Ilustración 61).

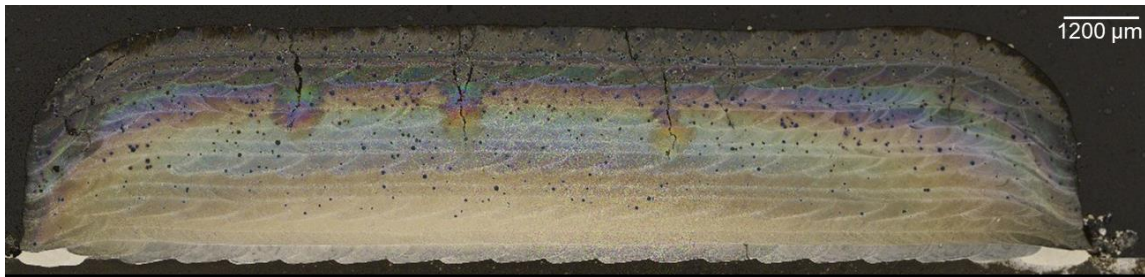


Ilustración 61. Sección Recubrimiento II

Las muestras de las tres secciones realizadas en el recubrimiento presentan, en el análisis realizado mediante el microscopio confocal, unas dimensiones acordes con lo esperado y una dispersión incremental de las partículas del material duro, el carburo de tungsteno, desde el sustrato hasta las capas cercanas a la superficie, lo que ayudará al cambio en las propiedades del material FMG.

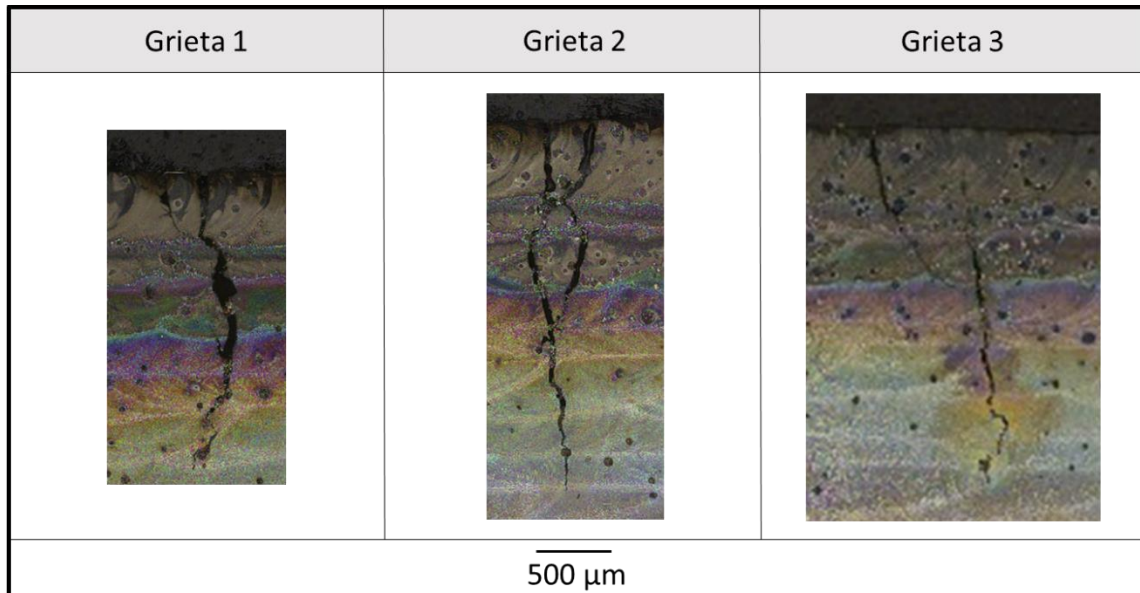


Ilustración 62. Grietas Recubrimiento II

Por otra parte, presentan grietas en las esquinas superiores generadas en el enfriamiento de la pieza (véase Ilustración 62). Pero gracias a este cambio de propiedades del material con gradiente funcional es posible evitar agrietamientos en el resto del recubrimiento minimizando las tensiones residuales, como podría pasar en

procesos de fabricación no optimizados como el primer recubrimiento realizado, o la no correcta adhesión del recubrimiento, en el caso de una transición drástica de una base dúctil a un recubrimiento duro.

Dada la similar distribución de las partículas de carburo de tungsteno en el Stellite 6, se da por supuesto que la dureza incrementará de forma similar en este segundo recubrimiento. El incremento de dureza, manteniendo la ductilidad del sustrato para soportar los continuos impactos de la estampación y la gran dureza superficial resultante para evitar el desgaste en la medida de lo posible es una de las metas que perseguía este estudio, por ser imprescindible para el aumento de la vida útil de estas herramientas de alto valor añadido, evitando así el tener que sustituir o repararlas.

Estos resultados son una muestra irrefutable de que los procesos de aporte por láser son una opción válida a tener en cuenta para los procesos de fabricación industriales de los recubrimientos de los troqueles de estampación en caliente, y no solo eso, las beneficiosas propiedades proporcionadas por los materiales con gradiente funcional y su fácil aplicación en los procesos de aporte por láser hacen que sea un método realmente competitivo en la industria.

Gracias a ese estudio de la fabricación de los materiales FGM se ha podido comprobar que una combinación de materiales, aparentemente incompatibles dada su diferencia en las propiedades, pueden ser unidas gracias a un cambio gradual en la composición del recubrimiento.



## 8. Descripción de tareas. Diagrama Gantt

### 8.1. Descripción de tareas

A lo largo de este trabajo fin de máster, se realizan diversas tareas para la ejecución de esta investigación. Durante el período de ejecución de este proyecto, se ha tomado nota de las fechas más significativas (como inicio o final de diferentes apartados) tal como se puede ver en el diagrama Gantt.

El diagrama Gantt de la planificación está disponible al final de este punto (véase Gráfica 3) y el desarrollo del estudio es la siguiente:

#### 8.1.1. Documentación

Antes de empezar con el estudio es imprescindible informarse sobre los distintos factores que toman parte en él. Por lo que lo primero, es investigar los procesos de estampación en caliente, sus troqueles y necesidades para comprobar la viabilidad de la propuesta realizada. Una vez aclarado ese punto, es necesario investigar a fondo los materiales FGM, sus ventajas y complicaciones que puedan surgir y la aplicación de los procesos LMD para la fabricación de este tipo de elementos, además de indagar sobre los materiales que se utilizarán en el trabajo.

Para todo ello, se logrará documentación referente al proyecto, desde artículos de investigación, hasta libros de teoría del tema que se trata.

#### 8.1.2. Planificación del proyecto

Se realiza la selección y aprovisionamiento de los materiales que se manipularán durante el proyecto, desde el gas de protección y arrase hasta el sustrato y el material a aportar. Además, se toman las decisiones pertinentes sobre cómo proceder con los ensayos y como evaluarlos.

#### 8.1.3. Preparación de los experimentos I

Antes de realizar cualquier experimento, se requiere una puesta a punto del equipo y la materia prima a utilizar. Por ejemplo, la instalación de equipos ajenos a la máquina de procesamiento láser como el termopar, preparar el sustrato para tener la calidad superficial deseada para trabajar con ella o rellenar las tolvas del alimentador con los polvos metálicos adecuados.

#### 8.1.4. Ensayos experimentales I

En este punto del trabajo se realizan los experimentos necesarios para la obtención del primer recubrimiento, es decir, el ensayo de control y el primer recubrimiento FGM.

Durante el proceso, se toman las imágenes de la fabricación, y tras la ejecución de los experimentos, se analiza las secciones de los experimentos mediante el microscopio confocal Leica. Además, en el ensayo del recubrimiento FGM, se realiza un estudio de las microdurezas en el elemento mediante un durómetro.

Se recopila toda la información de la calidad metalúrgica y durezas y, se pasa a gráficas o tablas para poder estudiarlas y evaluarlas con detenimiento. De esta manera, será posible detectar los posibles defectos y pensar en cómo optimizar el proceso para mejorar resultados.

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

Vistos los resultados del experimento del recubrimiento, se toman medidas para poder mejorar la fabricación de los recubrimientos FGM. Se tomarán las decisiones pertinentes para encauzar el proyecto hacia un exitoso revestimiento para los troqueles de estampación en caliente.

#### **8.1.6. Preparación de los experimentos II**

De la misma manera que en los anteriores experimentos, se requiere poner a punto el equipamiento y la materia prima necesaria para los ensayos. Como antes, se instala el termopar y se consigue la calidad superficial deseada del sustrato.

#### **8.1.7. Ensayos experimentales II**

Para finalizar con los experimentos necesarios con el fin de lograr el segundo recubrimiento, se procede con la caracterización y la fabricación del recubrimiento FGM final.

Tal como en los anteriores experimentos, se recogen todos los datos posibles, como los análisis metalográficos y de microdurezas, y se realiza una posterior evaluación de todas ellas para dar fin al estudio.

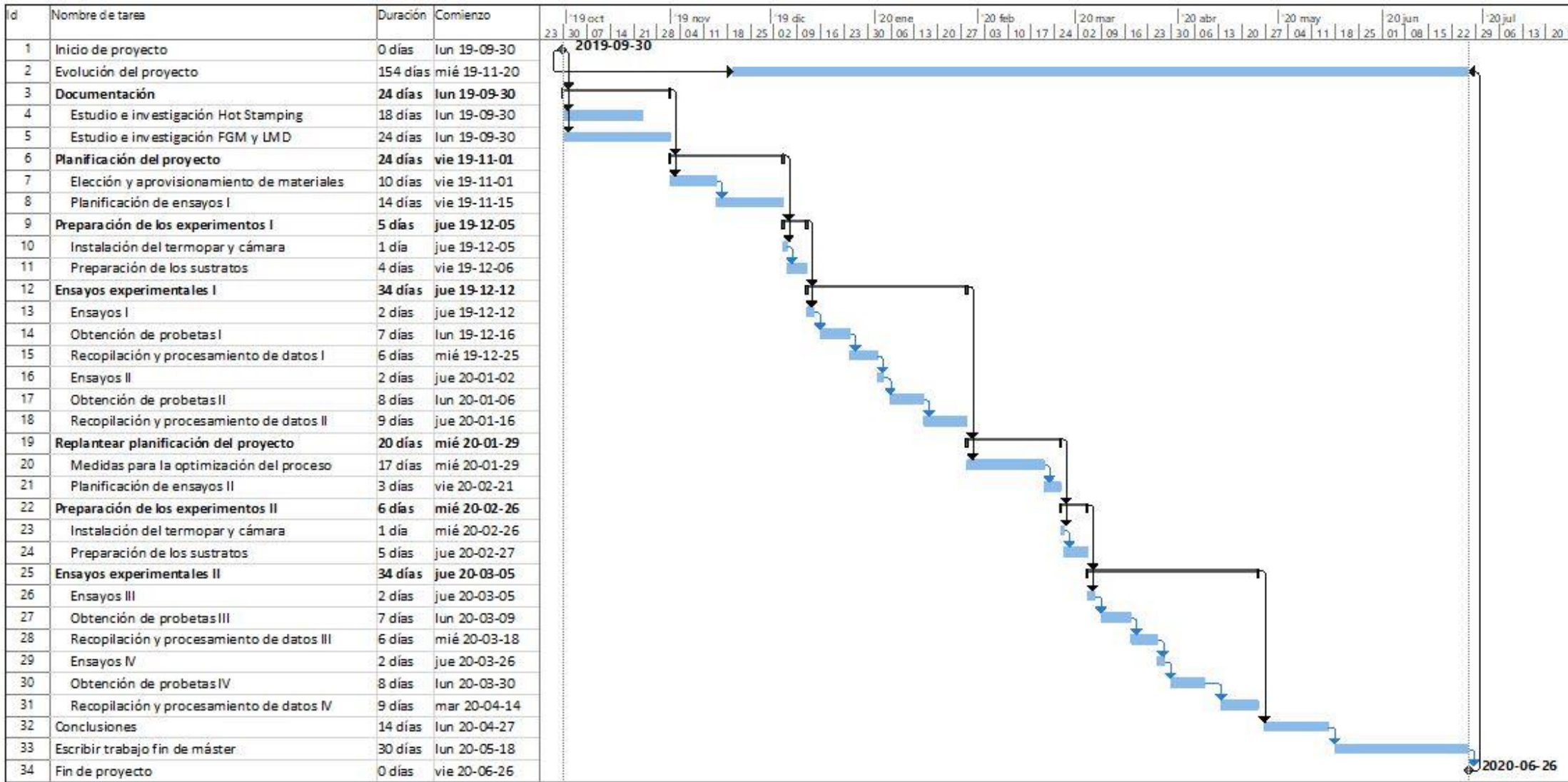
Para concluir, se procesan todos los datos relevantes del estudio y se redactan unas conclusiones en base a los conocimientos adquiridos.

#### **8.1.8. Escribir el trabajo fin de máster**

Para dar por terminado el presente trabajo fin de máster, se documenta toda la información recopilada durante la investigación "Fabricación de recubrimientos de alta resistencia por LMD para estampación en caliente", redactando de manera clara y concisa los resultados obtenidos y sus conclusiones.

## 8.2. Diagrama Gantt

Gráfica 3. Planificación del proyecto, Diagrama Gantt







## 9. Presupuesto

A continuación, se detalla el presupuesto necesario para la realización de este proyecto de investigación y este está compuesto por la suma de todos los costes relativos al mismo.

Durante este punto del trabajo se calculan los costes tanto humanos como materiales y la amortización asociada a ellos.

### Recursos humanos

En esta partida se detallan las horas dedicadas por todas aquellas personas que contribuyeron a la realización de este trabajo. Estas horas representan un coste que será el cálculo de horas internas (véase Tabla 15).

Tabla 15. Desglose de recursos humanos

Horas internas	Salario	Tiempo	Total
Director de proyecto	50 €/h	50 h	2.500 €
Ingeniero senior	40 €/h	450 h	18.000 €
Ingeniero junior	20 €/h	800 h	16.000 €
Técnico de taller	25 €/h	70 h	1.750 €
			38.250 €

<b>Total recursos humanos</b>	<b>38.250 €</b>
-------------------------------	-----------------

### Recursos materiales

En esta partida se recogen tanto amortizaciones, como gastos fungibles. En las amortizaciones se encuentran los equipos o licencias informáticas que ya se encontraban disponibles previamente para la realización del estudio. Por lo tanto, se especifica el coste del tiempo de utilización de los activos fijos del proyecto, proporcional a la vida útil de estos elementos (véase Tabla 16).

Tabla 16. Desglose de amortizaciones

Máquina herramienta	Coste	Tiempo	Vida útil	Valor residual	Total
Centro laser	328.000 €	150 h	6 año(s)	1.300 €	4.254 €
Pirómetro IGAR 12-LO	8.000 €	80 h	4 año(s)	50 €	82,81 €
Pulidora	5.000 €	100 h	10 año(s)	0 €	26,04 €

Rectificadora	47.000 €	15 h	10 año(s)	100 €	36,64 €
Encapsuladora	9.000 €	10 h	6 año(s)	50 €	7,77 €
Sierra metalográfica	10.000 €	12 h	7 año(s)	50 €	8,88 €
Microscopio confocal	230.000 €	40 h	8 año(s)	700 €	597,1 €
Durómetro	15.000 €	5 h	8 año(s)	100 €	4,85 €
					5.018 €

Equipo informático	Coste	Tiempo	Vida útil	Valor residual	Total
Portátil Packard bell	600 €	400 h	4 año(s)	40 €	29,17 €
Torre de ordenador HP	1.000 €	200 h	5 año(s)	50 €	19,79 €
Licencia Microsoft Office	150 €	400 h	1 año(s)	---	31,25 €
Licencia Leica	4.500 €	40 h	1 año(s)	---	93,75 €
Licencia Design Expert	2.000 €	40 h	1 año(s)	---	41,67 €
					216 €

En el apartado de gastos se incluye todo aquello que haya sido utilizado para la realización del estudio, pero que no se podrá volver a utilizar para posteriores trabajos de investigación (véase Tabla 17).

Tabla 17. Desglose de gastos

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

Materiales	Coste	Total
Barra acero laminado F-114	50 €	50 €
Polvo Stellite 6	500 €	500 €
Polvo Carburo de tungsteno	550 €	550 €

Disco de corte de caucho	100 €	100 €
Lijas de diamante	200 €	200 €
Paños de base metálica	100 €	100 €
Spray de diamantes	90 €	90 €
Argón 2X	300 €	300 €
Resina para encapsular	50 €	50 €
Ácido oxálico	50 €	50 €
		1.990 €

**Total recursos materiales**

**7.344 €**

Finalmente, para poder calcular el presupuesto total, se ha de realizar la suma de los costes parciales de los recursos y añadirle los costes indirectos como el internet o la electricidad. Además, es necesario sumarle otro porcentaje para imprevistos que puedan surgir y el IVA de todo ello (véase Tabla 18).

Tabla 18. Presupuesto final

<b>Subtotal</b>	45.594 €
<b>Costes indirectos (15%)</b>	6.839 €
<b>Coste directo e indirecto</b>	52.433 €
<b>Imprevistos (5%)</b>	2.622 €
<b>IVA (21%)</b>	11.011 €
<b>Total</b>	<b>66.065 €</b>

En este proyecto han participado tres ingenieros y un técnico y el coste de los recursos humanos ha sido de 38.250 €. Por otra parte, en lo que a recursos materiales se refiere, la suma de los costes de los fungibles y la escasa amortización del equipamiento del taller da como resultado 7.344 €.

Para los costes indirectos, tales como la luz general o el internet se impone un porcentaje de los gastos directos de un 15% que se aproxima al valor real. Para los imprevistos que puedan suceder se decide que se aportará un 5% más de los costes directo e indirecto.

Tras la suma del cálculo del IVA, la suma del presupuesto total final de todo este proyecto es de 66.065 €.



## 10. Análisis de riesgos

La ejecución de la investigación de este estudio conlleva consigo determinados riesgos, y conocer de antemano estos es necesario para poder prevenir en la medida de lo posible los distintos problemas.

### 10.1. Análisis de riesgo de objetivos

En lo que a objetivos y a resultados del proyecto respecta, se corre el peligro de no conseguir las metas propuestas con dicho estudio o de que el proceso sea inviable para el proceso planteado. De esta manera, la inversión realizada para esta investigación no lograría el fruto deseado.

Por otro lado, existe la posibilidad de no haber elegido correctamente los materiales de aporte. El hecho de haber elegido los materiales con las propiedades más adecuadas en favor de la aplicación práctica en el sector, podría suponer no elegir los materiales idóneos para el estudio y el cumplimiento de los objetivos.

En lo referente a los ensayos, también existe el riesgo de lograr unos recubrimientos totalmente agrietados e inservibles, esto podría ocurrir si el abanico de posibilidades propuestas en la optimización es insuficiente y se prosiguiese con parámetros inadecuados o de realizar un estudio bibliográfico insuficiente y los mismos parámetros de inicio fuesen incorrectos. También podría darse que los análisis para el estudio fuesen insuficientes y se necesitasen más, como estudios más a fondo con rayos X o análisis destructivos de grano para tratar de lograr unos resultados con mayor precisión para el proyecto (véase Tabla 19).

Las calificaciones de las próximas tablas se realizarán del uno al cinco, donde el 1 es el mínimo y 5 el máximo. El 5 en la siguiente tabla podría simbolizar gran impacto o alta probabilidad dependiendo de la columna en la que se encuentre.

*Tabla 19. Análisis de riesgos de objetivos*

Riesgo	Impacto	Probabilidad	Acción correctora
No lograr un exitoso recubrimiento para los troqueles	3	4	Replantear los ensayos a realizar y definir los nuevos experimentos
Mala elección de los materiales a investigar	4	3	Ampliar el estudio de los materiales para este tipo de procesos
Análisis realizados insuficientes	5	2	Realizar distintos análisis para obtener resultados

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

En lo que a la maquinaria se refiere, los riesgos posibles tienden a ser más daños materiales o peligro para la salud. Por lo que, cada una de las máquinas contiene sus propias medidas de seguridad particulares para evitar cualquier incidente que pueda suceder.

Por ejemplo, el generador láser podría inyectar más potencia de la que debería o sobrecalentarse convirtiéndose peligroso, por esa razón, el equipo está vinculado a un sistema de refrigeración. De no estar conectado este sistema de refrigeración, el generador láser no sería capaz de funcionar como medida de seguridad.

En lo que al centro de procesamiento se refiere, la boquilla podría llegar a incrustarse por mal funcionamiento o programación, pudiendo incluso romper las lentes que enfocan el láser. Por otro lado, es totalmente obligatorio que las puertas del centro estén cerradas siempre que el proceso de fabricación o cualquier tipo de ensayo esté en marcha. De la misma forma, la sierra metalúrgica ha de estar cerrada en todo momento siempre que esté en funcionamiento, para evitar que cualquier elemento pueda salir disparado o que la sierra corte al usuario mientras trata de cambiar los discos o manipular la pieza a cortar.

El alimentador de polvo por su parte, podría contaminar la pieza de no limpiar bien su sistema antes de introducir el polvo necesario para el presente trabajo mezclándolo con otra aleación de polvos. Purezas de polvos aparte, el sistema de distribución del alimentador de polvo podría tener alguna fuga, impidiendo así, que todo el polvo y el gas lleguen a su destino e inyecten menor cantidad de material a la zona del proceso LMD perjudicando el aporte y la salud de los que se encuentren en el entorno, pues estos polvos metálicos son cancerígenos.

Por otro lado, las máquinas de metrología como el microscopio confocal o el durómetro, también podrían sufrir algún defecto en su funcionamiento y calcular mal el acercamiento a la probeta. En el caso del microscopio confocal podría pasar lo mismo que con la boquilla del láser, que se incrustase y rompiese la lente; o en el caso del durómetro realizar mal los cálculos de dureza (véase Tabla 20).

Tabla 20. Análisis de riesgo de la maquinaria del proyecto

Máquina	Riesgo	Probabilidad	Prevención
Generador láser	5	1	Si
Centro de fabricación	4	2	Si
Sierra metalográfica	2	2	Si
Rectificadora	3	3	Si
Alimentador de polvo	5	2	
Durómetro	1	1	
Microscopio confocal	4	1	Si



Tal y como en la anterior tabla, se evalúa del uno al cinco, siendo en 1 el valor de menor riesgo o probabilidad y el 5 el de mayor valor. Estos valores dependen de la peligrosidad para la salud o daños materiales.

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

Las materias primas de este tipo de procesos adquieren una especial importancia en el análisis de riesgos, al nombrar los riesgos que pueden conllevar. Estos materiales podrían generar daños críticos en la salud de los trabajadores del entorno del proceso y, por ese motivo la prevención es de vital importancia con el fin de evitar que cualquier accidente pueda acontecer.

Los polvos de Stellite 6 y carburo de tungsteno utilizados para los experimentos del presente trabajo son cancerígenos si se ingieren o inhalan. Para poder prevenir que eso suceda cuando se manipulen los materiales, hay que tener especial cuidado para no desprenderlos además de utilizar máscara con filtro de diámetros pequeños para respirar y guantes de látex para evitar el contacto. También es recomendable el uso de gafas protectoras.

El ataque electrolítico se emplea en un entorno de ácido oxálico, con el que hay que tener sumo cuidado en todo momento. Este compuesto es combustible con el contacto de las llamas, además, los humos que expulsa pueden ser tóxicos o irritantes. La inhalación puede generar tos, dolor de garganta, sensación de quemazón o dolor de cabeza incluso, y de entrar en contacto con los ojos, enrojecimiento, visión borrosa o quemaduras. Por esa misma razón, el uso de guantes de látex, máscara para respirar y gafas protectoras para la protección de los ojos es imprescindible al tratar con el ácido oxálico.

El gas utilizado para los experimentos contiene argón en un alto grado de pureza. La fuga de este elemento en un recinto cerrado podría provocar asfixia a los trabajadores. Por otro lado, una inhalación prolongada en él tiempo de este gas, podría provocar esterilidad.

Tabla 21. Análisis de riesgo de materias primas

Materias primas	Riesgo	Probabilidad	Prevención
Polvo Stellite 6	5	2	Si
Polvo CW	5	2	Si
Ácido oxálico	4	2	Si
Argón	1	1	

Tal como en las anteriores tablas el riesgo y la probabilidad han sido calificadas del uno al cinco, siendo 1 el de menor riesgo o probabilidad y 5 el de mayor valor.



## 11. Discusión y conclusiones

### 11.1. Discusión

Como se ha podido comprobar en los resultados obtenidos en este estudio, los recubrimientos de altas prestaciones para los procesos de estampación en caliente son capaces de adherir las prestaciones necesarias a los troqueles para lograr alargar la vida de estas herramientas de alto valor añadido. Desde hace algún tiempo, se han llevado a cabo numerosos estudios sobre optimizaciones, como recubrimientos, para los troqueles de estampación en caliente, esto es debido a las mejoras que requiere el sector automovilístico para la reducción de peso de las capas y la complejidad añadida que requieren estas herramientas.

La fabricación de estos elementos mediante procesos LMD es sumamente beneficioso, pero hay ciertas características de la fabricación con las que hay que tener sumo cuidado y adquirir compromisos para la obtención de un exitoso recubrimiento con gradiente funcional. A la hora de aportar el material es indispensable no sobrecalentarlo, para ello, se han de tener controlados la potencia y el avance de la fabricación aditiva, dado que el rápido enfriamiento del material podría agrietar el recubrimiento dada su alta dureza y falta de ductilidad en las zonas más cercanas a la superficie. Dejando a un lado la energía emitida por unidad de medida, también se ha de tener controlado el flujo másico de polvo metálico para evitar defectos, como faltas de llenado. Con lo cual, es totalmente necesaria la optimización de parámetro de entrada, en busca de un equilibrio para la fabricación LMD.

A pesar de estas dificultades, la fabricación aditiva ofrece ventajas imposibles de concebir mediante otros métodos de fabricación. En concreto, los procesos LMD son capaces de generar geometrías complejas, de manipular materiales complicados para mecanizar o de trabajar con distintas aleaciones metálicas para mejorar las propiedades de la pieza. Además, este tipo de procesos consigue focalizar el calor en un área reducida mediante el haz láser y, de esta manera, logra no incidir en demasía sobre las propiedades del sustrato como pasa con la soldadura, que la zona afectada térmicamente es superior.

En esta investigación la fabricación del recubrimiento con gradiente funcional se ha realizado con Stellite 6 y carburo de tungsteno, variando la composición en peso del aporte desde un 0% de carburo de tungsteno cerca del sustrato hasta un 40% en las últimas capas de la superficie. Este cambio de composición gradual en el material, se traduce en un cambio en sus propiedades.

La dureza del recubrimiento es el parámetro que más cambia con el aumento del carburo de tungsteno en la composición. La dureza incrementa de forma gradual hasta la superficie, en la zona donde mayor cantidad de partículas de carburo de tungsteno hay. Esto no solo verifica la capacidad de los materiales FGM de lograr una buena unión metalúrgica entre un sustrato dúctil con el revestimiento con alta dureza superficial, sino que también corrobora la exitosa aplicación de la fabricación de recubrimientos de altas prestaciones mediante métodos más sofisticados, como son los procesos de aporte por láser.

## 11.2. Conclusiones

Este proyecto evalúa la influencia de los recubrimientos FGM para los procesos de estampación en caliente y la capacidad de fabricación de los procesos LMD para este tipo de materiales. Se estudia la fabricación de un recubrimiento con gradiente funcional compuesto por Stellite 6 y carburo de tungsteno sobre un sustrato dúctil de acero laminado F – 114.

Respecto al análisis de la calidad metalúrgica, el recubrimiento muestra una buena fusión de los materiales empleados y una dispersión acorde con lo necesario de carburo de tungsteno en el Stellite 6. También ha de mencionarse que la fabricación del recubrimiento sin los parámetros adecuados es propensa a generar grietas y defectos en la calidad metalúrgica del mismo. Las tensiones residuales resultantes de la fabricación de dicho recubrimiento generan el agrietamiento de la superficie, y se ha de tener en cuenta que las propias partículas de carburo de tungsteno utilizadas para el endurecimiento del recubrimiento FGM, aparecen como concentradores de tensiones que ayudan en la propagación de las grietas.

La dureza del elemento es la propiedad que más varía desde el sustrato hasta la superficie, más concretamente de un 173 HV de dureza en el entorno del sustrato hasta un 675 HV de dureza superficial. Esta característica del material FGM utilizado para esta investigación, permite tener un sustrato dúctil que aguante los impactos de la estampación y una alta dureza superficial que minimice el desgaste por abrasión a altas temperaturas, logrando una unión metalúrgica entre sustrato y recubrimiento gracias al cambio gradual en la composición.

Por lo tanto, ha de tenerse en consideración la capacidad de los procesos LMD en la fabricación de recubrimientos FGM de altas prestaciones en la industria, puesto que los beneficios obtenidos como el aumento de la vida útil de los troqueles de estampación en caliente, superan ampliamente las razones económicas de la fabricación del recubrimiento.

## 12. Bibliografía

- [1] Horn A., Merklein M., “Functional optimization of hot-stamped components by local carburization”, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* **3**, 43-54 (2019)
- [2] Zhang B., Jaiswal P., Rai R., Nelaturi S., “Additive manufacturing of Functionally Graded Material objects: a review”, *Journal of Computing and Information Science in Engineering* **18**, 41002-41018 (2018)
- [3] Chengxi L., Junjia C., Zhongwen X., Hongya F., Hao Z., “Investigation of Cooling Effect of Hot-stamping Dies by Numerical Simulation”, *Physics Procedia* **25**, 118-124 (2012)
- [4] Mahamood R. M., Akinlabi E. T., “Laser metal deposition of functionally graded Ti6Al4V/TiC”, *Materials and Design* **84**, 402-410 (2015)
- [5] Altan T., (2007). *Stamping Journal: R&D Update: Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts - Part I - Process methods and uses*. Recuperado de <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/hot-stamping-boron-alloyed-steels-for-automotive-parts>
- [6] Silfvast W. T., *Laser fundamentals, vol. 2*, Cambridge University, Cambridge (2008)
- [7] IK4 Research Alliance Orain Gipuzoa, (2016). *Procesos de fabricación basados en tecnología Láser: Oportunidades y claves para su incorporación en la empresa* (p. 16).
- [8] Mercado J. Á., (2016). Jose Angel Mercado S. A.: *Todo lo que necesita saber sobre el corte por láser*. Recuperado de <https://www.joseangelmercado.com/blog/lo-necesita-saber-corte-laser/>
- [9] maquinasyequipos.com, (2010). Máquinas y Equipos: *Micromecanizado y texturizado de moldes con láser de nanosegundo...y hasta femtosegundo*. Recuperado de <https://maquinasyequipos.com.ar/micromecanizado-y-texturizado-de-moldes-con-laser-de-nanosegundoy-hasta-femtosegundo/>
- [10] Avilés R., *Métodos de cálculo de fatiga para ingeniería. Metales*, Editorial Paraninfo, Bilbao (2015)
- [11] 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*. Recuperado de <https://artech.es/soldadura-laser/>
- [12] 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)
- [13] Toyerskani E., Khajepour A., Corbin S., *Laser Cladding, 1 ed.*, CRP Press LLC, Boca Raton (2005)

- [14] 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)
- [15] Mazumder J., Stern K. H., *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, Chapman & Hall, London (1996)
- [16] Breinan E.M., Kear B.H., "Rapid solidification laser processing at higher power density", *Materials Processing: Theory and Practices* **3**, 235-295 (1983)
- [17] Brueckner F., Riede M., Mueller M., Marquardt F., Knoll M., Willner R., Seidel A., Lopéz E., Leyens C., Beyer E., "Fabrication of metallic multi-material components using Laser Metal Deposition", *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2530-2538 (2017)
- [18] Pei Y. T., Ocelík V., De Hosson J. Th. M., "Interfacial adhesion of laser clad functionally graded materials", *Materials Science and Engineering* **342**, 192-200 (2003)
- [19] statease.com, (2019). Design Expert 12: *Design of Experiments (DOE) Made Easy*. Recuperado de <https://www.statease.com/software/design-expert/>
- [20] Rofin Laser Macro, *Rofin FL Series. High Brightness Fiber Lasers – Precise, Fast and Reliable*, ROFIN-SINAR Laser GmbH, Hamburgo (2011)
- [21] lenntech.es. Lenntech: *Argón (Ar) Propiedades químicas del Argón – Efectos del Argón sobre la salud – Efectos ambientales del Argón*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ar.htm>
- [22] nippongases.com. Nippon Gases: The Gas Professionals: *Argón (Ar)*. Recuperado de <https://nippongases.com/es/gases/argon>
- [23] acerosurssa.es. Urssa aceros especiales: *URSSA C45 / F114. Buen temple*. Recuperado de <https://www.acerosurssa.es/es/aceros-de-construccion/14-urssa-c45-f114-buen-temple.html>
- [24] Cadenas M., Cuentos J. M., Fernández J. E., Vega L. M., de Damborenea J., "Recubrimiento de Stellite6 sobre acero inoxidable con láser de CO2 para válvulas de escape de motores diesel", *Revista de metalurgia* **38**, 457-463 (2002)
- [25] Janicki D., Muszyfaga-Staszuk M., "Direct diode laser cladding of inconel 625/WC composite coatings", *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* **62**, 363-372 (2016)
- [26] Xu G., Kutsuna M., Liu Z., Sun L., "Characteristic behaviours of clad layer by a multi-layer laser cladding with powder mixture of Stellite6 and tungsten carbide", *Surface & Coatings Technology* **201**, 3385-3392 (2006)
- [27] Zhong M., Liu W., Yao K., Goussain J. C., Mayer C., Becker A., "Microstructural evolution in high power laser cladding of Stellite 6+WC layers", *Surface and Coatings Technology* **157**, 128-137 (2002)
- [28] Wanga G., Zhanga J., Shub R., Yanga S., "High temperature wear resistance and thermal fatigue behavior of Stellite-6/WC coatings produced by laser

- cladding with Co-coated WC powder”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* **81**, 63-70 (2019)
- [29] Janicki D., Górká J., Kotarska A., “Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings”, *Welding Technology review* **90**, (2018)
- [30] Kim H. C., Shon I. J., Garay J. E., Munir Z. A., “Consolidation and properties of binderless sub-micron tungsten carbide by field-activated sintering”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* **22**, 257-264 (2004)
- [31] struers.com. Struers Ensuring Certainty: *Ataque metalográfico*. Recuperado de <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Etching#>
- [32] i Biot J. P., (2017). Fischer Instruments: *Microdureza: algúnos tópicos*. Recuperado de <https://www.interempresas.net/TTS/Articulos/186215-Microdureza-algunos-topicos.html>