

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MASTER

ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL RECICLADO DE POLVO DE INCONEL 718 PARA EL PROCESO DE LMD



Estudiante: Gómez Gómez, Iker

Director: Lamikiz Mentxaka, Aitzol

Curso: 2023/2024

Fecha: Bilbao, 6 de junio de 2024

RESUMEN

Las tecnologías de fabricación aditiva, como el LMD (Laser Metal Deposition), se están abriendo camino en muchos sectores de la industria. Gracias a su versatilidad y a la ausencia de fuerzas de mecanizado y desgaste, permiten replantear el diseño de muchos componentes, optimizándolos en toda su cadena de valor. Además, al tratarse de un proceso termofísico, permite procesar fácilmente materiales muy difíciles de mecanizar. Pero existe un gran inconveniente: debido a la baja eficiencia en la unión entre el polvo y el sustrato, hasta la mitad del material de aporte puede quedar sin adherir, convirtiéndose en residuo.

En un esfuerzo por abordar este problema, se plantea mediante este documento una metodología para estudiar la posibilidad de reutilizar polvo de Inconel 718 en el proceso de LMD. Esta metodología está basada en ciclos de uso en los que se simula una fabricación activando polvo y láser en vacío para generar polvo suficiente para el siguiente ciclo. Los resultados no son del todo concluyentes, aunque se ven cambios significativos en las dimensiones de las pruebas a partir del tercer ciclo, por lo que se plantea una prueba de verificación de la metodología empleada. El resultado de esta prueba indica que, aunque sí se provocan cambios en el polvo, el método empleado no replica suficientemente una fabricación real.

Palabras clave: LMD, Inconel 718, reciclado de polvo.

LABURPENA

LMD (Laser Metal Deposition) bezalako fabrikazio gehigarriko teknologiak industriako hainbat sektoretan sartzen ari dira. Bere moldagarritasunari eta mekanizazio-indarrak eta higadurak ez izateari esker, osagai askoren diseinua birpentsatzea ahalbidetzen dute, pieza balio-kate osoan optimizatuz. Gainera, prozesu termofisikoa denez, mekanizatze oso zailak diren materialak erraz prozesatu ahal dira. Hala ere, eragozpen handia dago: hautsa eta oinarria arteko loturaren eraginkortasun baxua dela eta, ekarpen-materialaren erdia arte itsatsi gabe gera daiteke, hondakin bihurtuz.

Arazo hori konpontzeko ahaleginean, dokumentu honek Inconel 718 hautsa LMD prozesuan berrerabiltzeko aukera aztertzeko metodologia bat proposatzen du. Metodologia hau erabilera-zikloetan oinarrituta dago, fabrikazioa simulatuz hautsa eta laserra mugimendu hutsean aktibatuz hurrengo ziklorako hautsa nahikoa sortzeko. Emaitzak ez dira erabat argiak, nahiz eta aldaketa esanguratsuak ikusten diren probetako dimentsioetan hirugarren ziklotik aurrera, hori dela eta, erabilitako metodologiaren berrespen-proba bat proposatzen da. Proba horren emaitzak adierazten du hautsean aldaketak eragiten direla, baina erabilitako metodoak ez duela fabrikazio erreal bat behar bezala errepikatzen.

Gako hitzak: LMD, Inconel 718, hauts birziklapena.

ABSTRACT

Additive manufacturing technologies, such as LMD (Laser Metal Deposition), are making their way into many industrial sectors. Due to their versatility and the absence of machining forces and wear, they allow for the redesign of many components, optimizing them throughout their value chain. Additionally, being a thermophysical process, it easily processes materials that are very difficult to machine. However, there is a major drawback: due to the low efficiency in the adhesion between the powder and the substrate, up to half of the feed material may remain unattached, turning into waste.

In an effort to address this problem, this document proposes a methodology to study the possibility of reusing Inconel 718 powder in the LMD process, based on usage cycles where fabrication is simulated by activating powder and laser in idle movement to generate enough powder for the next cycle. The results are not entirely conclusive, although significant changes in the dimensions of the tests are observed from the third cycle onwards, so a verification test of the methodology used is suggested. The result of this test indicates that although changes in the powder are indeed induced, the method employed does not sufficiently replicate a real manufacturing process.

Key words: LMD, Inconel 718, powder recycling.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1 MEMORIA.....	7
1.1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.2 CONTEXTO.....	8
1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE.....	9
1.4 BENEFICIOS.....	10
1.5 Estado del arte.....	11
1.6 ANÁLISIS DE RIESGOS.....	27
1.7 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	30
1.8 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	32
2 METODOLOGÍA.....	33
2.1 DESCRIPCIÓN DE FASES, EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS.....	33
2.2 PLAMIFICACIÓN.....	36
2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
3 ASPECTOS ECONÓMICOS.....	54
3.1 HORAS INTERNAS.....	54
3.2 GASTOS.....	54
3.3 AMORTIZACIONES.....	54
3.4 PRESUPUESTO.....	55
4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	56
4.1 CONCLUSIONES.....	56
4.2 TRABAJOS FUTUROS.....	56
5 BIBLIOGRAFÍA.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de la introducción del reciclado en LMD.....	7
Figura 2: taller del departamento de ingeniería mecánica de la UPV/EHU.....	8
Figura 3: Emisión de un fotón desde un átomo excitado.....	11
Figura 4: Generación del láser: a) Generación de fotones de dirección aleatoria. b) Los fotones perpendiculares a los espejos se multiplican mientras los demás se disipan. c) Casi todos los fotones tienen la misma dirección, algunos atraviesan el semiespejo.....	11
Figura 5: Enfoque de luz normal vs enfoque de un láser.....	13
Figura 6: Resumen de tecnologías de fabricación aditiva. Fuente: AMpower	14
Figura 7: Esquema del proceso de aporte.....	15
Figura 8: Dimensiones principales de un cordón	17
Figura 9: Atomización por gas	22
Figura 10: Equipos utilizados: 1.-Centro DED 2.-Alimentador de polvo 3.-Fuente del láser 4.-Rectificadora 5.-Sierra metalográfica 6.-Limpiadora de ultrasonidos 7.- Torre de tamices 8.-Pulidora 9.-Encapsuladora 10.-Microscopio Leica.....	26
Figura 11. Diagrama simplificado de propuesta de ensayos.	32
Figura 12: Esquema de la fabricación de las probetas.....	33
Figura 13: Esquema del proceso de laseado	34
Figura 14. Disposición de la columna de tamices.	35
Figura 15: Muestras de polvo para análisis en el SEM.....	35
Figura 16: diagrama de Gantt del proyecto	37
Figura 17: Resultado de una fabricación	38
Figura 18: Morfología del polvo virgen.....	39
Figura 19: Ciclo 1 - Cordón.....	40
Figura 20: Ciclo 1 - Prisma.....	40
Figura 21: Ciclo 1 - Cono de polvo	41
Figura 22: Ciclo 1 - Morfología del polvo.....	41
Figura 23: Ciclo 2 - Cordón.....	43
Figura 24: Ciclo 2 - Prisma.....	43
Figura 25: Ciclo 2 - Cono de polvo	44
Figura 26: Ciclo 2 - Morfología del polvo.....	44
Figura 27: Ciclo 3 - Cordón.....	45
Figura 28: Ciclo 3 - Prisma.....	45
Figura 29: Ciclo 3 - Cono de polvo	46
Figura 30: Ciclo 3 - Morfología del polvo.....	46
Figura 31: Ciclo 4 - Cordón.....	47
Figura 32: Ciclo 4 - Prisma.....	47
Figura 33: Ciclo 4 - Cono de polvo	48
Figura 34: Ciclo 4 - Morfología del polvo.....	48
Figura 35: Ciclo 5 - Cordón.....	49
Figura 36: Ciclo 5 - Prisma.....	49
Figura 37: Ciclo 5 - Cono de polvo	50
Figura 38: Ciclo 5 - Morfología del polvo.....	50
Figura 39: Resumen de composiciones	51
Figura 40: Validación de la metodología - morfología del polvo.....	52
Figura 41: Validación de la metodología - composiciones	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición del Inconel 718.....	19
Tabla 2: Propiedades mecánicas y térmicas del Inconel 718.....	20
Tabla 3: Matriz probabilidad - impacto	27
Tabla 4: Clasificación de riesgos.....	28
Tabla 5: Resumen de los parámetros de referencia.....	38
Tabla 6: Composición del polvo de referencia.....	39
Tabla 7: Ciclo 1 – Composición (%wt).....	42
Tabla 8: Ciclo 2 – Composición (%wt).....	44
Tabla 9: Ciclo 3 - Composición	46
Tabla 10: Ciclo 4 - Composición.....	48
Tabla 11: Ciclo 5 - Composición.....	50
Tabla 12: Resumen de dimensiones de los cordones.....	51
Tabla 13: Resumen de dimensiones de los prismas.....	51
Tabla 14: Presupuesto	55

1 MEMORIA

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde las últimas décadas, la fabricación aditiva está transformando diversos campos industriales, como el sector aeronáutico o el de la troquelería. Fabricar componentes añadiendo material a la pieza en lugar de eliminándolo permite plantear diseños completamente nuevos para componentes existentes, reparar piezas dañadas o desgastadas y generar geometrías que serían imposibles de alcanzar con otros métodos.

Uno de los métodos más empleados en la fabricación aditiva es el Láser Metal Deposition, en adelante LMD. Mediante este proceso, que se explica en mayor profundidad en este documento, se depositan capas de metal a base de fundir polvo metálico junto con parte de la pieza base, o sustrato, con un láser. Pese a sus múltiples beneficios, este método de fabricación presenta un gran inconveniente, y es que la eficiencia en la deposición de polvo puede ser muy baja, incluso inferior al 50%, lo que implicaría que más de la mitad del polvo empleado se desaprovecha. Actualmente, este material se desecha, con todos los costes y problemas medioambientales que ello conlleva.

En este proyecto, se lleva a cabo un estudio que busca analizar la posibilidad de introducir una etapa de reciclado en el proceso de tal forma que la parte del polvo hasta ahora desperdiciado que mantenga propiedades adecuadas para la fabricación se aproveche para futuras piezas, minimizando el desperdicio. Para ello, se plantea una metodología cíclica en la que se reutiliza 5 veces polvo de Inconel 718, analizando en cada ciclo el resultado de una fabricación y la morfología y composición del polvo.

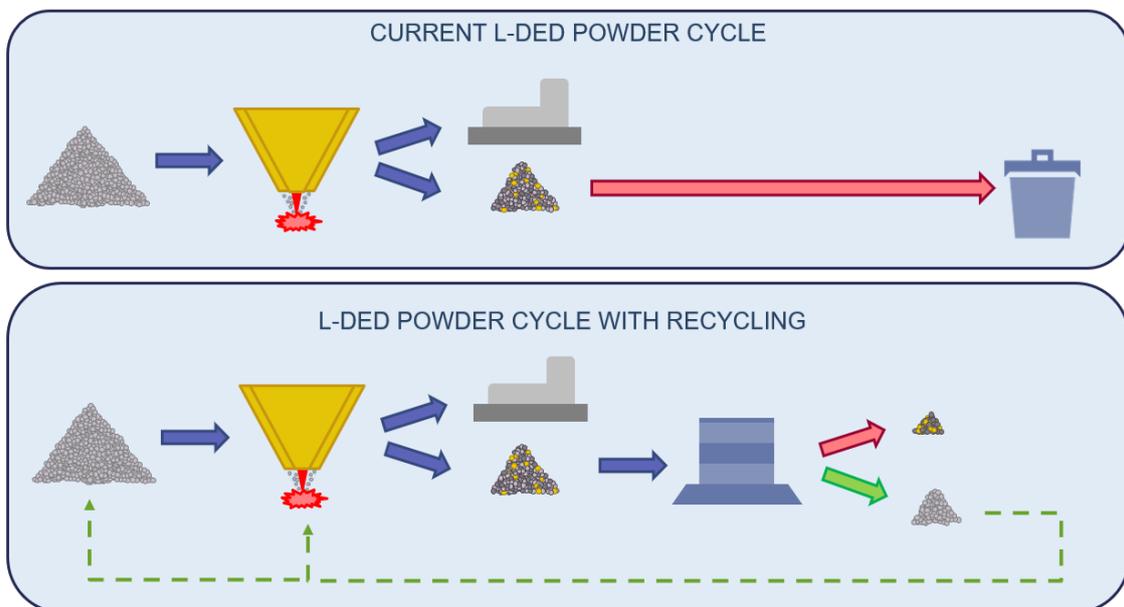


Figura 1: Esquema de la introducción del reciclado en LMD

1.2 CONTEXTO

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se enmarca dentro del proyecto Edison, del programa Elkartek del Gobierno Vasco. Mediante este programa, se busca fomentar la investigación en la comunidad autónoma mediante un conjunto de proyectos de financiación pública como este.

El proyecto Edison busca el desarrollo de tecnologías de fabricación aditiva más sostenibles, digitales e inteligentes para lograr una industria más eficiente en toda su cadena de valor. Entre los objetivos del proyecto se encuentran la utilización de nuevos materiales en varios procesos de fabricación aditiva, la optimización de parámetros, la introducción de tecnologías de simulación y monitorización y la búsqueda de la sostenibilidad. Para ello, colaboran profesionales de Lortek, Tecnalia, Azterlan, Tekniker, Ceit, IMH y la UPV/EHU.

La parte del proyecto correspondiente a este TFM se desarrolla principalmente en el taller industrial que forma parte del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao y en el Centro de Fabricación Avanzada en Aeronáutica - CFAA, dentro del grupo de Fabricación de Alto Rendimiento. Este grupo está formado por más de 40 integrantes, incluyendo profesores, investigadores, doctorandos y estudiantes de grado y máster. La actividad principal del grupo consiste en el desarrollo de proyectos relacionados con la investigación de diferentes procesos de mecanizado, electroerosión, rectificado y tecnologías de fabricación basadas en el láser. (Ver figura 2).



Figura 2: taller del departamento de ingeniería mecánica de la UPV/EHU

1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE

1.3.1 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es analizar la posibilidad de reciclar polvo de Inconel 718 en el proceso de LMD. En la actualidad, las operaciones de LMD se realizan en sistemas basados en robots o centros de mecanizado que aportan el material con diferentes configuraciones cinemáticas. En todos los casos, el polvo que se inyecta a través del cabezal y no se deposita, cae fuera de la zona de aporte y se considera un residuo. De esta forma, el trabajo pretende recoger este polvo y tratarlo con el objetivo de que pueda ser reutilizado en nuevas fabricaciones junto con material nuevo. Para ello, se deben satisfacer los siguientes objetivos secundarios:

- Establecer un procedimiento de recogida y tratamiento del polvo utilizado para su posterior reciclado.
- Generación de polvo suficiente para siguientes fases mediante la simulación de varios ciclos de uso de polvo.
- Análisis de la evolución de la morfología y la composición del polvo tras cada ciclo, comparando éstos con el polvo virgen original.
- Evaluación de los resultados de una fabricación en cada ciclo de reciclado, estableciendo la fabricación con polvo nuevo como las propiedades de referencia.

Mediante este proyecto se persigue en realidad un objetivo más amplio, lograr una fabricación aditiva más sostenible y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, tratando de reducir el impacto del proceso en concepto de reducción de materias primas y energía necesaria para realizar el proceso de aporte por láser. Asimismo, se pretende reducir el coste del proceso mediante el ahorro del material de partida, cuyo precio es relevante dentro de los costes del proceso.

1.3.2 Alcance

Para alcanzar los objetivos expuestos, se debe comenzar planteando una metodología basada en la repetición de ciclos de utilización del polvo, que permita analizar diferentes características del material en cada uno.

Por un lado, se busca controlar las propiedades del polvo. Para entender correctamente el efecto de la fabricación en las partículas no adheridas al sustrato. Para ello, se debe analizar la forma del polvo, en busca de partículas deformadas, pegadas o la presencia de poros o satélites. Además, la presencia de óxidos, la formación de nuevos compuestos y variaciones generales en la composición pueden afectar no solo a las propiedades de las piezas, si no a la propia fabricación, alterando la fluidez, la soldabilidad o la temperatura de fusión, por lo que también deben estudiarse. Por otro lado, se busca analizar el resultado de una fabricación real en cada ciclo, por lo que se plantearán probetas representativas para su análisis metalográfico.

Dentro del alcance del proyecto se prevé la realización de pruebas o análisis complementarios que permitan una mayor comprensión de lo sucedido durante las pruebas y de los resultados obtenidos.

1.4 BENEFICIOS

Los beneficios que puede aportar el trabajo se van a analizar en términos de los beneficios que aportaría la introducción de un sistema efectivo de reciclado o reutilizado de polvo, desde un enfoque técnico, económico y medioambiental.

El principal beneficio técnico surge de la propia metodología desarrollada, que contempla tanto la generación, recogida y tratamiento del polvo, como el análisis de sus propiedades y del comportamiento en proceso. Esto supone un doble beneficio, ya que además de obtener información acerca del comportamiento del Inconel durante el reciclado, se genera una base sobre la que plantear un futuro proceso de reciclado integrado en la producción.

En el ámbito económico, el polvo sobrante de la fabricación, es decir, aquel que no se ha adherido a la pieza se podría considerar como materia prima que ha sido desperdiciada. Además, se trata de una materia prima cara, ya que la fabricación del polvo es bastante más compleja que la laminación de chapas o palanquillas. El reciclaje de parte de este polvo supondría una menor necesidad de materias primas, o, en otras palabras, un aumento en la eficiencia del uso del polvo. Como beneficio añadido, se generan menos desechos durante el proceso de aporte, lo que minimiza operaciones de gestión de residuos que pueden ser considerados peligrosos.

Desde el punto de vista medioambiental, esta reducción de desperdicios evita que el polvo acabe llegando al ambiente tras una mala gestión, donde podría contaminar la tierra y cuerpos de agua cercanos a la planta de fabricación y causar daños a múltiples especies de plantas o animales. Además, al aprovechar un mayor porcentaje del polvo comprado, la demanda de cada empresa bajaría, por lo que se requeriría un menor volumen de fabricación total, reduciendo aún más las emisiones asociadas a proceso. Por lo tanto, desde un punto de vista global, el reciclaje del polvo reduce la huella de carbono equivalente de las piezas fabricadas por LMD en diferentes fases de su ciclo de vida.

Estos beneficios potenciales indican que el proyecto está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En efecto, el objetivo 12, producción y consumo responsable, está directamente relacionado con la reutilización de materias primas sobrantes en un proceso de fabricación. Además, la minimización de emisiones de polvo al entorno y la reducción de la huella de carbono ayudan a satisfacer los objetivos 13, 14, y 15, que buscan proteger el medio ambiente, y la fauna terrestre y marina, respectivamente.

1.5 Estado del arte

1.5.1 Láser

Como su propio nombre indica (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), un láser consiste en la emisión estimulada de un haz de luz amplificado. Existen varios tipos de láser, pero todos funcionan según los mismos principios. Se parte de un material que se conoce como medio activo que emite luz al ser excitado (estimulado), y que según el tipo de láser puede ser sólido, líquido o gaseoso. La excitación del medio activo se conoce como bombeo y también depende del tipo de láser, yendo desde impulsos eléctricos o pulsos de luz a reacciones químicas, entre otros. Gracias al bombeo, algunos átomos del medio activo se excitan, es decir, pasan a un estado energético superior. Cuando un átomo excitado vuelve a su estado original de manera espontánea, este emite un fotón cuya longitud de onda depende del material, pero su dirección y fase son aleatorios. Si un fotón interactúa con un átomo excitado, este emite otro fotón que tiene la misma dirección y fase que el anterior, como puede verse en la figura 3. [1]

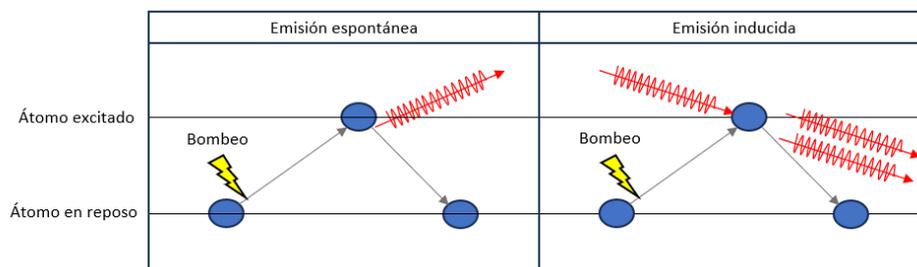


Figura 3: Emisión de un fotón desde un átomo excitado

Situando el medio activo entre dos espejos paralelos, se consigue que cualquier fotón paralelo al eje perpendicular a los espejos se multiplique (o amplifique), mientras que el resto se disipan. Sustituyendo uno de estos espejos por un semiespejo, un material que refleja parte de la luz que recibe dejando pasar cierto porcentaje, se extraen parte de estos fotones, que focalizados mediante conjuntos ópticos forman el haz del láser (figura 4).

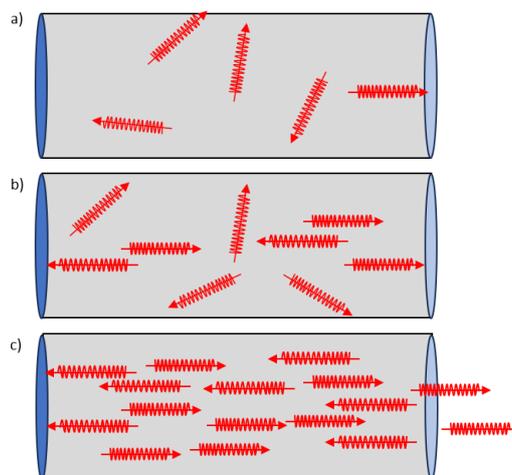


Figura 4: Generación del láser: a) Generación de fotones de dirección aleatoria. b) Los fotones perpendiculares a los espejos se multiplican mientras los demás se disipan. c) Casi todos los fotones tienen la misma dirección, algunos atraviesan el semiespejo.

Existen muchos tipos de láser, en función del material que forma el medio activo. A continuación, se describen los más utilizados a nivel industrial [2]:

- Diodo: está formado por un semiconductor similar al de un diodo LED, que emite un haz láser de unos pocos milivátios. Para poder utilizar este tipo de láser en la industria, es necesario colocar muchos diodos en paralelo, enfocándolos en el mismo punto. Esta disposición hace que, incluso a potencias relativamente bajas, la calidad del haz sea mala. La longitud de onda de estos láseres varía entre 0,76 y 0,98 micras, lo que supone que emiten en el infrarrojo cercano, por lo que puede ser transportado mediante fibra óptica. La potencia máxima de estos equipos se ve limitada por la calidad, ya que esta disminuye con el número de láseres en paralelo. Se pueden llegar a alcanzar potencias superiores a 40 kW, pero por este motivo, no se suele utilizar nada superior a 10 kW. Por otro lado, los diodos son relativamente eficientes comparados con otros tipos de láser, pudiendo sobrepasar el 40% de eficiencia.
- CO₂: este tipo de láser utiliza como medio activo una mezcla de gases (CO₂, N₂ y He), que emiten un haz de gran calidad que puede alcanzar potencias de hasta 20 kW, pero con eficiencias inferiores al 15%. Sin embargo, su longitud de onda de 10,6 micras (infrarrojo lejano) supone graves limitaciones, ya que no permite transportar el haz mediante fibra óptica, por lo que debe guiarse mediante sistemas de tubos telescópicos y espejos. Además, en esa zona del espectro la absorptividad de la mayoría de los metales es muy baja, lo que obliga a utilizar potencias mayores.
- Estado sólido: el láser de estado sólido original es el de tipo barra, que utiliza como medio activo un cristal cilíndrico de Nd:YAG (granate de itrio-aluminio dopado con neodimio) que emite luz al ser excitado mediante disparos de lámparas flash o pulsos de láseres de diodo. Este láser tiene una longitud de onda de 1,06, similar a la del diodo, y una eficiencia del 30%. Por otro lado, tiene menor precisión que el láser de CO₂, y la dificultad para refrigerar una barra sólida limita su rango de potencia a 8kW. Como solución a este problema, existen dos desarrollos del láser de barra que juegan con la relación de aspecto del cristal facilitando la refrigeración, el láser de disco y el de fibra. La mayor superficie por unidad de volumen de estas variantes, junto con la sustitución del neodimio por iterbio como material dopante, permiten alcanzar potencias mucho más altas, llegando incluso a los 100 kW.

Los principales fabricantes de láser actualmente son Trumpf, IPG Photonics, Coherent-Rofin y Han's Laser Technology. Trumpf y Coherent, ahora asociado con Rofin, son referentes en el mercado con años de experiencia en la fabricación de láseres de diodo, CO₂ y estado sólido. IPG Photonics se especializa más en láseres de fibra, aunque también fabrican láseres de diodo de baja potencia para el bombeo de láseres de estado sólido. Han's Laser Technology es el líder chino del sector, fabricante de láser de fibra y CO₂. Otros fabricantes importantes son Lumentum, Jenoptik y Novanta.

Como consecuencia de la forma en la que se genera, el láser es un haz de luz coherente, es decir, todos los fotones emitidos tienen la misma fase, longitud de onda y dirección. La dirección de salida de un fotón tras atravesar de una lente

depende principalmente de los dos últimos factores, por lo que el láser puede concentrarse en un área mucho más pequeña que una emisión de luz blanca adireccional como la que daría una linterna o una bombilla. Gracias a esta propiedad, se pueden conseguir densidades de energía del orden de 10^{10} kW/m² con láseres de unos pocos kilovatios. [1]

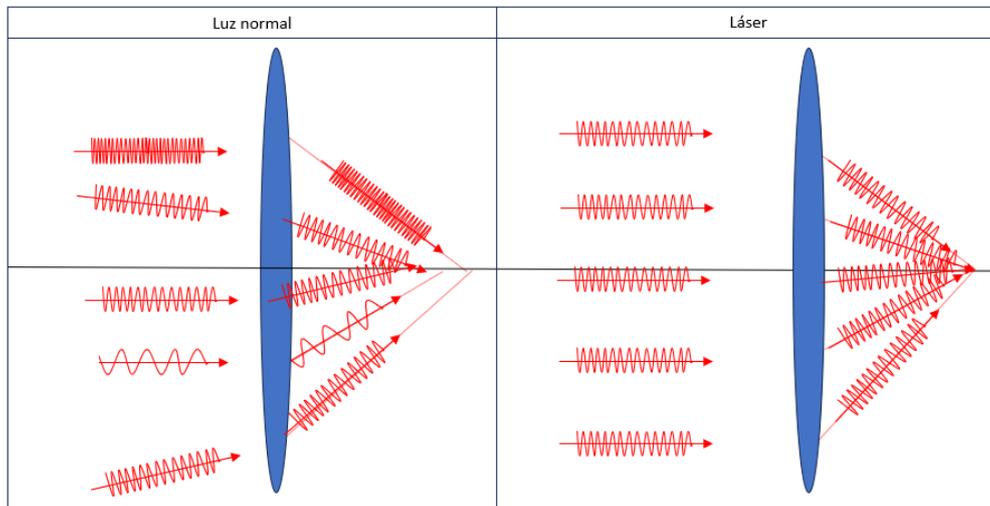


Figura 5: Enfoque de luz normal vs enfoque de un láser

Los procesos basados en el láser son puramente térmicos, no existe contacto entre pieza y herramienta. Esto proporciona grandes ventajas respecto a otros procesos ya que, al no haber fuerzas de corte, no presentan problemas de rotura, desgaste o fatiga de herramientas. Esto también supone menores fuerzas de inercia del cabezal, lo que abarata los costes de los ejes y permite alcanzar velocidades mayores para procesos como el corte láser. Además, para determinadas aplicaciones pueden utilizarse escáneres, lo que aumenta las velocidades de trabajo al orden de metros por segundo.

Pese a estas características, el láser comenzó como una "solución en busca de problemas", una tecnología con grandes posibilidades para la que aún no había aplicaciones. Einstein ya predijo la posibilidad de emitir un haz de fotones mediante la estimulación de un material según las leyes de la física cuántica a principios del siglo XX, pero no fue hasta 1960 que se fabricó el primer láser propiamente dicho, utilizando un cristal de rubí excitado mediante una lámpara flash.[3] Durante las décadas de los 60 y 70 se fueron desarrollando varios tipos de láser, que durante los veinte años siguientes se fueron implantando en diferentes procesos industriales. Actualmente, se utiliza en operaciones básicas de mecanizado, como el corte de chapa, ofreciendo grandes ventajas de velocidad, versatilidad, durabilidad de herramientas y precisión respecto a operaciones tradicionales. Otro grupo de aplicaciones, importante es el de operaciones superficiales, como el marcado, el texturizado o tratamientos térmicos como el temple láser. Además, ha permitido la fabricación aditiva con materiales metálicos mediante métodos como el LMD. Cabe también destacar sus aplicaciones menos directamente industriales como la medición por láser, la lectura de CD o sus aplicaciones biomédicas.[4]

1.5.2 LMD

Comenzamos la definición contextualizando el proceso dentro de los procesos de fabricación, como un proceso de fabricación aditiva. Los procesos de fabricación aditiva son aquellos en los que se fabrica añadiendo material a la pieza. Estos procesos se pueden clasificar a su vez en dos grandes grupos, los basados en la fusión de material, y los basados en el sinterizado.

Los procesos basados en el sinterizado se dividen a su vez en dos subconjuntos, los de extrusión como serían las impresoras 3D comerciales, y los basados en la unión de partículas mediante aglutinante, como el binder jetting. Los basados en la fusión también se dividen en dos grupos, los basados en lecho de polvo fundido (PBF) selectivamente mediante un láser o un haz de electrones, y los que se engloban bajo el nombre de Directed Energy Deposition, o DED. Dentro de este grupo se encuentra el LMD, representado en el esquema como Laser Beam Additive Manufacturing o LBAM, en el que se utiliza un láser para fundir material metálico en forma de polvo o hilo. El DED engloba además otros dos procesos más, en los que se añade material en formato de hilo, pero la fuente de calor es un haz de electrones (Electron Beam Additive Manufacturing, o EBAM) o un arco eléctrico (Wire Arc Additive Manufacturing, o WAAM). [5]

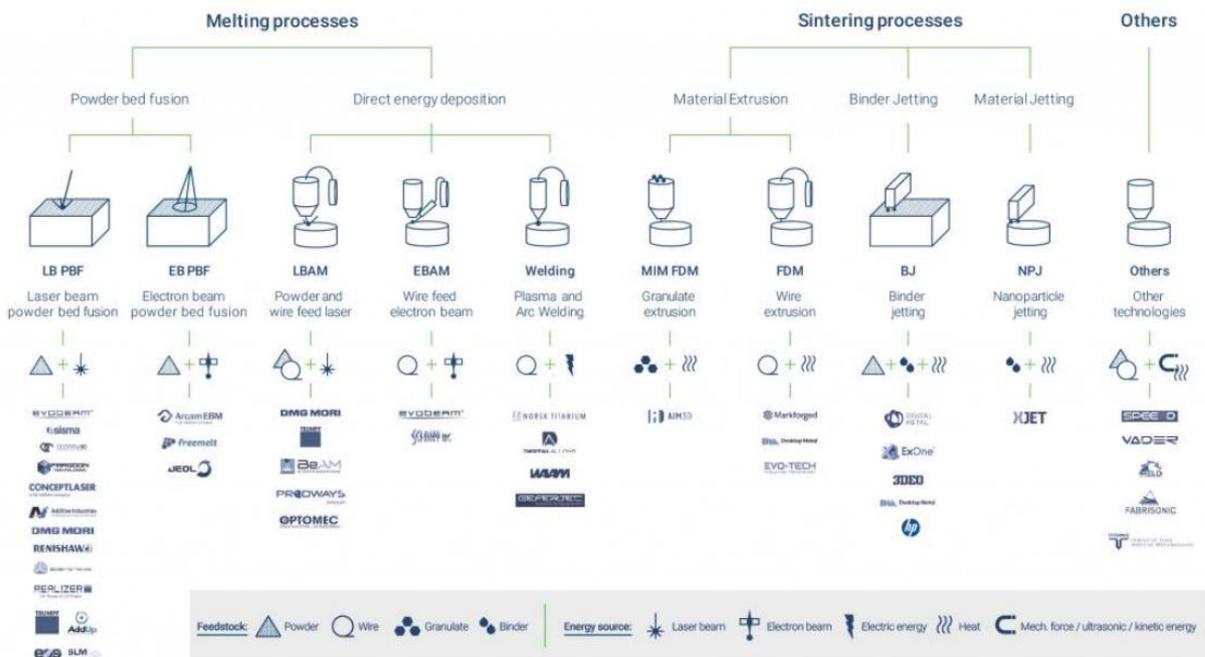


Figura 6: Resumen de tecnologías de fabricación aditiva. Fuente: AMpower

El LMD por inyección de polvo es un proceso complejo en el que intervienen múltiples factores. El material aportado, en formato de polvo, se transporta desde el alimentador hasta el cabezal arrastrado por un gas inerte, donde se distribuye entre varios inyectores lineales (boquilla discreta) o formando un cono completo (boquilla continua, la utilizada en este proyecto) que lo concentran en un punto del material base, denominado sustrato. Sobre el mismo punto del sustrato se focaliza el láser, que viaja desde la fuente hasta el cabezal mediante una fibra óptica, y llega a la pieza por el eje central de la boquilla.

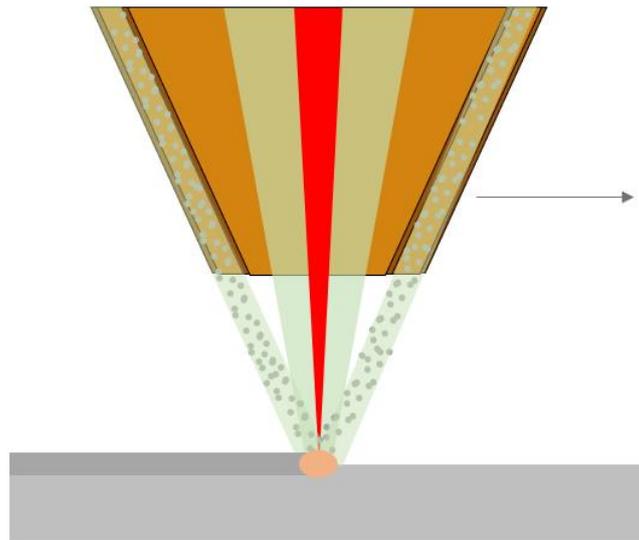


Figura 7: Esquema del proceso de aporte

En el punto focal, el láser funde algunas de las partículas de polvo y una pequeña parte del sustrato, generando un volumen de metal fundido conocido como baño fundido o melt pool. Al mover el punto focal por el sustrato, el melt pool solidifica protegido de la oxidación por el gas inerte que transporta el polvo (gas de arrastre), dando como resultado un cordón similar a uno de soldadura. Además, se añade un flujo adicional de gas por el camino del láser (gas de protección) que ayuda a proteger el melt pool de la oxidación y evita que vapores, humos y partículas entren al interior de la boquilla, dañándola o ensuciando las lentes internas del cabezal.

Si se disponen varios cordones en paralelo, solapando un cierto porcentaje de su espesor entre ellos, se genera una capa relativamente plana de material aportado. El componente se fabrica repitiendo el proceso añadiendo una nueva capa sobre la anterior de manera continua, adaptando la geometría de cada una a la forma de la pieza.

Este proceso presenta grandes ventajas respecto al mecanizado de piezas a partir de un tocho, siendo la principal su versatilidad. Gracias a la fabricación por capas se pueden alcanzar geometrías complejas que serían imposibles de lograr con herramientas de mecanizado, lo que permite rediseñar completamente algunas piezas, optimizando su forma. Además, al tratarse de un método aditivo, permite reparar componentes desgastados o dañados que de otra forma deberían volver a ser fabricados desde cero. Además, al no haber herramientas ni fuerzas de corte, no se requieren máquinas demasiado robustas, por lo que el cabezal se puede montar sobre un brazo robótico. [6]

Al tratarse de un proceso térmico, en algunos casos se puede alterar la dureza o la microestructura de los componentes en algunas zonas variando los parámetros del proceso o añadiendo tiempos de espera y cambiando el orden de las operaciones. De esta forma, se puede dotar a una pieza de propiedades diferentes en algunas de sus zonas, optimizando la funcionalidad. Por otro lado, las contracciones durante el enfriamiento pueden deformar la pieza, llegando incluso a generar grietas y roturas.

Otro inconveniente es el acabado, ya que, debido al solape entre cordones, la superficie de la pieza es ondulada y en algunos casos rugosa. Por este motivo se

deben realizar operaciones de mecanizado posteriores al menos en las superficies funcionales. Además, se requiere de refrigeración constante en el láser, la boquilla y las lentes y otros componentes ópticos para evitar daños o pérdidas de eficiencia en los mismos.

A continuación, se muestra una lista de los parámetros más importantes que entran en juego en el proceso de LMD:

- **Potencia del láser:** es uno de los parámetros más importantes, ya que determina la cantidad de energía disponible para generar el baño fundido. En base a esto, se deben ajustar los demás parámetros para aprovechar esta energía eficientemente, de tal forma que a mayor potencia se conseguirían cordones mayores ajustando el resto de parámetros. El rango de potencias en el que un determinado material puede trabajar está limitado inferiormente por la temperatura de fusión y superiormente por la calidad del cordón, que se considerará inadecuada si la forma no es favorable o se genera suficiente calor como para dañar térmicamente el sustrato o el cordón.
- **Caudal de polvo:** El caudal de polvo debe adaptarse a potencia empleada. Demasiado polvo supone una baja eficiencia, ya que muchas partículas no reciben energía suficiente como para adherirse al sustrato, y para caudales muy excesivos, el polvo puede apantallar el láser evitando que llegue suficiente potencia al sustrato, lo que resulta en un meltpool demasiado pequeño. Sin embargo, aportar con poco polvo provoca que llegue demasiada energía al sustrato, afectándolo demasiado térmicamente y dando como resultado cordones irregulares y con geometrías inadecuadas.
- **Velocidad:** Para una combinación eficiente de polvo y láser, la velocidad de aporte determina la forma del cordón y el tamaño del meltpool, reduciendo la altura al aumentarla, y con un efecto similar pero menor en la anchura. Debe tenerse en cuenta que la velocidad del spot determina la cantidad de polvo y la energía de láser que llegan al sustrato por unidad de longitud, por lo que velocidades muy altas pueden provocar que no se llegue a fundir el sustrato y las muy bajas que se acumule demasiado calor.
- **Caudal de gases:** para unos gramos por minuto de polvo determinados, el caudal de gas determina la velocidad con la que las partículas llegan al baño fundido, se debe buscar un valor suficiente para evitar oxidaciones o la generación de fuego, pero lo suficientemente bajo como para que las partículas no vayan demasiado rápido como para adherirse al cordón.
- **Tamaño y posición del spot:** es importante controlar los tamaños de spot de láser y polvo y la posición relativa entre ambos durante el aporte. Por lo general se busca que ambos sean del mismo diámetro y estén perfectamente alineados, pero para algunas aplicaciones concretas podría ser interesante aplicar diámetros ligeramente diferentes o algún tipo de descentre
- **Materiales:** La temperatura de fusión y la absorptividad tanto del material aportado como del sustrato limitan la potencia requerida para generar cordones adecuados. La conductividad térmica juega también un papel importante, ya que define la capacidad de evacuación de calor y, por tanto,

la velocidad de enfriamiento, que determina la microestructura y las propiedades mecánicas de la pieza. También se debe tener en cuenta la afinidad metalúrgica de los materiales, la tendencia a generar compuestos intermetálicos y la densidad en estado líquido, ya que algunos compuestos podrían "flotar" sobre otros en el meltpool generando cordones heterogéneos y defectuosos.

- Propiedades del polvo: además de su material, la granulometría y forma del polvo también tienen un efecto importante en el resultado de la fabricación. Este punto se desarrollará en mayor profundidad en el apartado correspondiente.
- Solape: el solape se define como el porcentaje del ancho de un cordón que se deposita sobre el anterior al disponerlos en paralelo para fabricar una capa. El objetivo de esto es superponer los laterales, de menor altura, de tal forma que crezcan hasta igualar la de los centros de los cordones. El resultado es una capa menos ondulada (se notan menos los cordones, dejando un acabado más plano) al aumentar el solape. A partir de cierto valor, la altura de la capa supera la altura de un cordón, pero valores demasiado grandes provocan el desperdicio de polvo. El valor óptimo del solape viene determinado por la forma del cordón, requiriéndose solapes menores para cordones con formas "cuadradas" y mayores para los "triangulares". Cordones más planos tienden a admitir un rango de valores de solape aceptables mayor que los cordones más abultados.

Se deben controlar las siguientes dimensiones del cordón[7]:

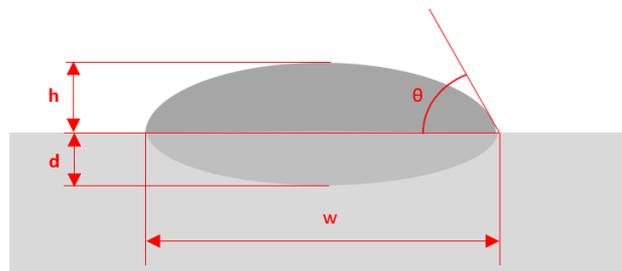


Figura 8: Dimensiones principales de un cordón

- d : penetración del cordón en el sustrato, que corresponde con la profundidad a la que llega el baño fundido, depende de la densidad de potencia del láser y de la velocidad de avance del mismo.
- w : anchura del cordón, depende tanto de la potencia del láser como del área sobre el que incide.
- h : altura del cordón respecto del sustrato, depende principalmente del flujo másico de polvo y su relación con la velocidad de avance.
- θ : ángulo de mojado, depende entre otros muchos factores de la velocidad de avance y del flujo másico de polvo. Es uno de los parámetros más determinantes de la calidad del cordón. Potencias demasiado altas pueden generar ángulos de mojado demasiado pequeños, mientras que la oxidación puede elevarlos hasta el punto de no tener a penas penetración.
- Dilución: se define como

$$D = \frac{b}{b+h}$$

Es, junto con el ángulo de mojado, la forma más típica de controlar la calidad del cordón. Se trata en realidad una simplificación de la definición de dilución en soldadura, que representa la fracción en área del cordón de soldadura que pertenece al material de las piezas soldadas. Diluciones pequeñas suponen cordones mal adheridos al sustrato, lo que puede dar lugar a roturas. Por otro lado, diluciones demasiado grandes implican una mayor zona afectada térmicamente, lo que puede suponer un gran problema. El valor que suele considerarse óptimo es de un cuarto.

- Relación de aspecto: es la relación entre la anchura y la altura de un cordón. Es una buena manera de controlar que los cordones tienen una forma adecuada. Los cordones más planos son más fáciles de solapar, ya que tienden menos a generar faltas de fusión. Cordones más altos, sin embargo, permiten conseguir capas más altas para tasas de aporte iguales, si se controla el solape de manera adecuada. Por lo general, suele buscarse que la altura constituya un tercio de la anchura del cordón, es decir, que tenga una relación de aspecto de 3.

$$AR = \frac{w}{h}$$

Debe tenerse en cuenta que estos parámetros no solo deben ser adecuados a nivel local, si no que deben mantenerse relativamente constantes durante todo el cordón. Además, se debe tener en cuenta la integridad metalúrgica del cordón, entendiendo como tal la ausencia de poros o grietas en su interior. Los poros se generan cuando pequeñas burbujas de gas inerte quedan atrapadas en el meltpool, y no logran alcanzar la superficie antes de solidificar, por lo que permanecen en el interior del cordón. Las grietas, por otro lado, se generan principalmente por las tensiones térmicas que se dan durante el enfriamiento, debido a la contracción de los materiales del cordón y el sustrato. Otro defecto importante son las faltas de fusión, que son zonas de la pieza que no se rellenan adecuadamente al solapar cordones, generando cavidades.

Por último, se debe controlar el efecto de la temperatura en la microestructura. La zona afectada térmicamente debe ser mínima, y generar una zona de transición gradual de dureza que evite la formación de grietas en el sustrato. Considerando las curvas de enfriamiento de los materiales del cordón y sustrato se puede no solo generar geometrías complejas, si no dotarlas de las propiedades adecuadas mediante el control de la microestructura. En caso de no considerar esto, puede darse el caso inverso, en el que, al generar la geometría deseada, se afecte negativamente a la dureza o la resistencia mecánica del componente. La velocidad de enfriamiento de cada punto dependerá de la conductividad del material, de las temperaturas alcanzadas, de la geometría de la pieza y de la estrategia de fabricación, principalmente.

1.5.3 Inconel 718

El Inconel es un conjunto de superaleaciones de base níquel-cromo que abarcan un amplio espectro de propiedades y composiciones. Estas aleaciones tienen buenas propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión incluso a temperaturas

superiores a 600°C. El Inconel 718 es una aleación con contenidos relativamente altos de hierro niobio y molibdeno y bajos de titanio y aluminio. Debido a su composición, este polvo supone riesgos para la salud que se explican en mayor detalle en el apartado de análisis de riesgos. La siguiente tabla muestra la composición completa del Inconel 718 [8]:

Tabla 1: Composición del Inconel 718

Composición															
ELEMENTO	Fe	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb	C	Mn	P	S	Si	Ti	Al	Co	B
%wt MIN	Resto	50	17	0	2.8	4.75	0	0	0	0	0	0.65	0.2	0	0
%wt MAX	Resto	55	21	0.3	3.3	5.5	0.08	0.35	0.15	0.15	0.35	1.15	0.8	1	0.006

Este Inconel, presenta endurecimiento por precipitación de carburos de titanio, niobio y cromo. El proceso de precipitación en el Inconel 718 implica la formación de fases intermetálicas dentro de la microestructura de la aleación durante el enfriamiento y el tratamiento térmico. Las principales fases precipitadas son la fase γ' (gamma prima) y la fase γ'' (gamma doble prima).

Durante el enfriamiento desde altas temperaturas, se forman núcleos de precipitación de la fase γ' principalmente compuesta por $Ni_3(Al, Ti)$. Estos núcleos marcan el inicio del crecimiento de las partículas de γ' , que se distribuyen de manera uniforme en la matriz de fase γ , en la que predomina el níquel y aleaciones de hierro y cromo. Esta fase proporciona una alta resistencia a la aleación y ayuda a mantener la estabilidad dimensional. Posteriormente, durante el tratamiento térmico de envejecimiento a temperaturas más bajas, se forma la fase γ'' , compuesta por $Ni_3(Ti, Nb)$. Esta fase precipitada refuerza aún más el material, mejorando sus propiedades mecánicas y su resistencia a la fluencia a altas temperaturas. [9]

La presencia de estas fases precipitadas, junto con la fase Laves (compuesta por níquel, niobio y aluminio, principalmente) y la fase δ (fase rica en hierro), generadas durante el enfriamiento, influyen en la microestructura general del Inconel 718, determinando sus propiedades finales, como la resistencia mecánica, la resistencia a la corrosión y la estabilidad dimensional. En el caso del LMD, el control de la temperatura de cada punto tanto en la fusión como en el enfriamiento durante la fabricación de las capas superiores determina la generación de las fases descritas y, por lo tanto, las propiedades de la pieza final.

Además de por precipitación, el Inconel 718 tiene una tendencia muy alta al endurecimiento por deformación en frío, es decir, la acumulación de dislocaciones en la red contribuye de manera muy relevante al desplazamiento de las mismas. Esto, sumado a su elevada ductilidad provoca que para un componente de 40HRc, la viruta llegue a alcanzar durezas superiores a 50HRc. Como consecuencia, la energía específica de corte para su mecanizado es muy elevada (3500 N/mm²). Otro factor que dificulta el mecanizado del Inconel es que los carburos generados durante el enfriamiento y los tratamientos térmicos tienen un alto poder abrasivo, lo que provoca importantes desgastes en las herramientas de corte. [10]

Debido a estos factores, el Inconel se considera un material muy difícil y caro de mecanizar. De hecho, para hacerlo se requieren velocidades muy bajas y profundidades de pasada y avances muy pequeños, llegando a utilizar en muchos

casos plaquitas cerámicas o técnicas de mecanizado abrasivo en lugar de herramientas de corte convencionales. Por este motivo, conviene utilizar procesos de fabricación que generen geometrías muy similares a las finales, como la fundición, la deformación en caliente o la fabricación aditiva.

Respecto a las propiedades térmicas del material, no difieren excesivamente de las de los aceros de uso convencional, por lo que no suponen un problema adicional durante la fabricación aditiva o el mecanizado.

La siguiente tabla recoge valores de referencia de las propiedades mecánicas y térmicas del Inconel 718, estas propiedades pueden variar en función de la composición y el tratamiento térmico aplicado.

Tabla 2: Propiedades mecánicas y térmicas del Inconel 718

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Densidad	8.2	g/cm ³
Módulo elástico (recocido/envejecido)	490/1220	MPa
Resistencia última (recocido/envejecido)	925/1400	MPa
Alargamiento a rotura (recocido/envejecido)	44/20	%
Temperatura de fusión	1325	°C
Calor específico a 23 °C	435	J/kg·K
Coefficiente de expansión térmica a 23 °C	13·10 ⁻⁶	1/K
Conductividad térmica a 23 °C	11.2	W/m·K

Las aplicaciones del Inconel 718 son aquellas en las que se requieren buenas propiedades mecánicas, de desgaste y corrosión a temperaturas elevadas, y el precio del componente no supone una limitación. Uno de los sectores en los que más se utiliza es el aeroespacial, donde se emplea para en torno a la mitad de los componentes del motor del avión, como la cámara de combustión de alta presión. Otras posibles aplicaciones son componentes de la industria química, reactores nucleares y tornillería para ambientes de alta corrosión y temperatura.[11]

1.5.4 Polvo

Las características del polvo influyen enormemente en el comportamiento del material en el proceso. Idealmente, se busca un polvo con partículas completamente esféricas, con una composición distribuida de manera uniforme en cada partícula y una distribución de tamaños gaussiana y centrada en el rango indicado por el fabricante. La realidad es que en el polvo pueden aparecer múltiples defectos, como los que se exponen a continuación [12]:

- Partículas no esféricas: la forma no esférica de las partículas provoca una peor fluidez del polvo, lo que crea variaciones de forma en el cono durante la fabricación. Esto hace que el aporte de material no sea constante, alterando la sección del cordón a lo largo de su eje.
- Partículas soldadas: se consideran tres casuísticas dentro de este tipo de defecto. Varias partículas muy pequeñas adheridas a una de tamaño aceptable, más conocido como partícula con satélites, tendrían un efecto similar a una partícula no esférica. Dos partículas de tamaño aceptable soldadas entre sí supondrían una fluidez del polvo notablemente inferior a

lo esperado, pudiendo causar problemas más graves. El tercer caso es en realidad igual que el segundo, pero con más de dos partículas adheridas. En este último caso se esperaría que el tamizado eliminase el defecto, ya que de no hacerlo se podrían llegar a generar tapones dentro del camino del polvo si la partícula no es capaz de atravesarlo debido a su tamaño y forma.

- Porosidad: Parámetros inadecuados de atomización pueden dar como resultado partículas que contienen poros en su interior. Esto fomenta notablemente la aparición de poros en el componente final, ya que el gas se introduce en el baño fundido directamente desde la partícula.
- Variaciones en la composición: en ocasiones, la composición del polvo difiere de la del metal fundido introducido a la tolva de atomización, lo que puede deberse a diferentes factores. Las aleaciones fundidas no son mezclas perfectamente homogéneas, por lo que la composición de cada partícula será diferente. Partículas con composiciones diferentes presentarán valores de tensión superficial diferente, por lo que formarán partículas con tendencia a tamaños diferentes. Por este motivo, el tamizar todo el rango de tamaños de una fabricación, la composición de cada rango de partículas extraído podría ser ligeramente diferente al anterior, y presentar partículas con concentraciones diferentes en su interior, afectando al comportamiento durante la fabricación.
- Oxidación e impurezas: una mala conservación del material en polvo puede provocar que este se oxide, reaccione con sustancias presentes en el aire o que se introduzcan impurezas en el mismo. En función del material y del tipo de impureza o compuesto formado, esto puede perjudicar la fabricación.

Estas características dependen enormemente en el proceso de fabricación empleado para generar el polvo. Existen varios métodos para la fabricación de polvo. Estos métodos se pueden clasificar en tres grandes grupos [13]:

- Procesos químicos: se basan en reacciones químicas en las que uno de los productos es el polvo que se pretende fabricar. Este grupo engloba la descomposición de gases, procesos de precipitación química o electrolítica o la reducción de óxidos, entre otros.
- Procesos mecánicos: en estos procesos se parte del material en formato barra o lingote, que se convierte el polvo utilizando herramientas abrasivas o mecánicas, como rodillos o prensas. Algunos ejemplos son la molienda, la granulación o la trituración por impacto.
- Procesos físicos, atomización: en este conjunto se engloban aquellos procesos en los que se genera el polvo a partir de la solidificación de pequeñas gotas de material fundido que, debido a su tensión superficial, forma partículas esféricas. Se consideran procesos físicos la atomización por plasma, por gas, por agua, por disco rotativo o por electrodo rotativo.

El proceso de fabricación utilizado para la obtención del Inconel empleado es el de atomización por gas. En este proceso, una colada de metal fundido fluye por el interior de una tobera, en cuya salida se inserta un flujo de gas inerte a alta presión. Al entrar en contacto, se forma una especie de spray de metal fundido en el que pequeñas gotas esféricas solidifican en el aire. El resultado es un conjunto de

partículas de un amplio rango de granulometrías que deben ser separadas mediante tamices. De esta forma, una única fabricación genera polvo para diferentes procesos que requieren tamaños de partículas diferentes. Para este proyecto, el polvo utilizado tiene una granulometría de entre 53 y 150 micras.

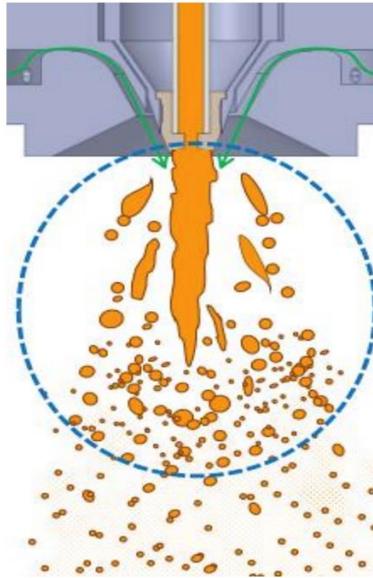


Figura 9: Atomización por gas

1.5.5 Sostenibilidad en LMD

Con la tecnología actual, el polvo sobrante de procesos de LMD se recoge y se trata como un residuo, que debe ser manejado y procesado adecuadamente, con el trabajo y costes adicionales que esto supone a la empresa. Malas prácticas o accidentes en esta parte del proceso pueden tener como resultado la emisión de las partículas metálicas al entorno, con los peligros que eso conlleva. En función del material y los parámetros utilizados, la eficiencia del proceso puede caer por debajo del 50%, lo que puede suponer un volumen considerable de polvo en una planta de producción con varias máquinas de LMD funcionando simultáneamente.

Si el polvo llega al ambiente podría causar graves problemas para personas, animales y plantas. Las emisiones prolongadas resultarían mortales para pájaros y mamíferos pequeños cercanos al entorno de la empresa, y causar importantes problemas de salud a animales más grandes. En caso de viajar con el viento o arrastrado por la lluvia hasta llegar a ríos, lagos o el mar, causaría daños similares a peces y otros animales que viven en cuerpos de agua. Además, las partículas supondrían cambios en la composición de la tierra y del fondo marino, dificultando el crecimiento de plantas y algas. Estas situaciones repercutirían más allá de la intoxicación directa para el ser humano, ya que además de por el aire el polvo podría entrar al organismo a través de peces o animales de granja intoxicados o de frutas y verduras salidas de campos contaminados.

Actualmente, los esfuerzos para abordar estos problemas se centran en la correcta gestión de residuos, pero el reciclado del polvo se encuentra aún en fase de desarrollo. A continuación, se muestran 3 casos de estudio en los que se conducen estudios similares al aquí presentado:

Caso de estudio 1: Effect of Powder Recycling on the Organization and Mechanical Properties of GH4169 Alloy by Laser Metal Deposition [14]

En este estudio realizado en la Northeast Electric Power University (NEEPU), en la ciudad de Jilin, China, se analiza el cambio en el tamaño de partícula, la morfología y la composición del polvo de la aleación GH4169, más comúnmente conocida como Inconel 718, así como los cambios en la microestructura y las propiedades mecánicas.

Tras cuatro ciclos de reciclado de polvo, se observa que el tamaño medio de partícula se incrementa en algo más de 4 micras, y aparecen partículas oxidadas, deformadas y con satélites. También se detectaron ligeros cambios en la composición, con el aumento de Nb, y la microestructura, ya que se da un sobrecrecimiento de grano gradualmente mayor al aumentar el número de ciclos. Respecto a las propiedades mecánicas, se redujo la resistencia y aumentó la elongación a rotura. El número y tamaño de los poros también se ve incrementado con los ciclos de reciclado.

Caso de estudio 2: Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material [15]

El segundo caso se desarrolló en la EHU, en colaboración con la Universidad de Burdeos e Ikerbasque. Se planteó una metodología con 5 ciclos de reutilizado, limpiando el polvo de impurezas y partículas no deseadas mediante tamizado y separación magnética entre ciclos. La composición química del polvo reciclado es similar a la del material original, pero el aumento en el contenido de oxígeno y niobio puede limitar su reutilización.

Los resultados muestran pocas diferencias entre la utilización de polvo nuevo o reciclado durante las dos primeras reutilizaciones, pero a partir del tercer ciclo la porosidad aumenta demasiado, afectando a las propiedades mecánicas de las probetas, como el alargamiento a rotura, que cae bruscamente. El tamaño medio de partícula aumenta ligeramente y la distribución se estrecha. También se observa un aumento en la circularidad y una disminución de la relación de aspecto, probablemente debido a la alta efectividad de la separación magnética de partículas parcial o totalmente oxidadas.

Caso de estudio 3: Understanding powder degradation in metal additive manufacturing to allow the upcycling of recycled powders [16]

En este estudio puramente bibliográfico conducido por expertos de la universidad de Lancaster, Inglaterra, se analiza el ciclo de vida completo del polvo para los procesos de LMD, PBF y Binder Jetting, con el objetivo de proponer soluciones que permitan minimizar el desperdicio y favorecer el reciclado. Se analizan los diferentes procesos de fabricación de polvo existentes, la degradación durante su uso y la gestión tras el final de su vida útil.

Las soluciones propuestas son las siguientes:

- Reacondicionamiento del polvo: el polvo hasta ahora desechado se envía de vuelta al fabricante, que lo reacondiciona analizando su estado, separando partículas indeseadas y juntándolo con polvo nuevo. De esta forma se genera polvo de peor calidad que podría ser utilizado por clientes con requerimientos menos exigentes.

- **Reacondicionamiento por plasma:** El proceso de atomización por plasma permite utilizar polvo como material de entrada, por lo que, añadiendo polvo con morfologías desfavorables, pero composiciones correctas, se puede conseguir polvo de alta calidad a partir de residuos de fabricación. Esto podría resultar interesante para materiales en los que la mayoría de los óxidos no deseados puedan separarse mediante separación magnética, pero la pérdida de forma de las partículas afecte demasiado a la fluidez del polvo como para poder reutilizarlo.

Las dos siguientes soluciones están más orientadas a los procesos de PBF y Binder Jetting, en los que gran parte del polvo no se ven afectadas de ninguna forma, por lo que el reciclaje es algo habitual. Aun así, podrían aplicarse también a LMD en caso de definir una metodología efectiva para el reciclaje de parte del polvo.

- **Uso de polvo de alta calidad:** al partir de polvo nuevo de mayor calidad, el material no adherido a la pieza también tendrá una calidad mayor, por lo que se podrá reutilizar más veces antes de tener que desecharlo. Una materia prima con especificaciones de calidad más estrictas puede resultar más cara, pero al permitir un mayor número de reutilizaciones se mejora la eficiencia global del proceso, por lo que podría resultar rentable.
- **Detección efectiva del fin del ciclo de vida:** en la línea de la solución anterior, la determinación de un método eficaz de detección de la pérdida de propiedades del polvo evitaría el desperdicio de polvo que aún admita reciclado. En este estudio se propone que la manera más efectiva para detectar esto sería la fabricación de una pequeña probeta representativa de las propiedades de la pieza, aunque para ello sería necesario disponer de las máquinas necesarias para ensayar dicha probeta, lo que puede suponer un problema para muchas empresas. En caso de poder aplicar este u otro método de detección del estado del polvo se podría optimizar el reciclado al máximo, pudiendo incluso utilizar polvo de diferentes grados de calidad para componentes de diferentes requerimientos mecánicos.

En resumen, el polvo se deteriora durante la durante su uso, sufriendo cambios en sus propiedades que afectan al resultado de futuras fabricaciones. Esta pérdida de calidad no es instantánea, y aplicando un procedimiento de reciclado efectivo se podría reutilizar el polvo en más de una ocasión. Además, polvos vírgenes de mayor calidad admitirían un mayor número de reutilizaciones, y una metodología efectiva para detectar la pérdida de propiedades permitiría utilizar polvo de diferente calidad para componentes de diferentes requerimientos mecánicos.

1.5.6 Equipamiento experimental empleado en el estudio

Centro de aporte LMD Kondia Aktinos 500

Esta máquina no es en realidad una máquina diseñada para LMD como tal, sino que se trata de una fresadora de tres ejes modelo Kondia B500 modificada. Se desmontó todo el cabezal rotativo y se sustituyó por uno adaptado para LMD. El alimentador de polvo y las botellas de argón se encuentran en el exterior de la máquina, conectados al cabezal mediante tubos antiestáticos de 6mm. La refrigeradora y el láser de también se encuentran en el exterior de la máquina,

transportando el agua y el láser mediante mangueras y fibra óptica, respectivamente. Así, el modelo se rebautizó como Kondia Aktinos 500.

El láser utilizado es de tipo fibra del modelo HighLight FL de 1 kW del fabricante Coherent Rofin. El alimentador de polvo es del fabricante Metkon. Se trata de un alimentador de tipo disco rotativo, en el que el polvo cae por gravedad desde una tolva presurizada a un disco rotativo que tiene una ranura que se llena de polvo. En el extremo diametralmente opuesto a la salida de la tolva se encuentra el tubo de salida del polvo hacia la máquina, por el que escapa el gas inerte del alimentador arrastrando el polvo. El flujo de polvo se controla ajustando el giro del disco y el caudal de gas de arrastre.

Rectificadora

La rectificadora utilizada durante el proyecto es una rectificadora plana completamente manual de 50 años de antigüedad de la empresa Hidro-Precis. Se rectificó sin una profundidad de pasada ni una profundidad total fijas, ya que el objetivo era aportar sobre una superficie uniforme y plana, no garantizar ninguna tolerancia en el sustrato. Al utilizar sustratos de acero blando, se pudo emplear una muela genérica de alúmina.

Tamizadora y torre de tamices

La torre de tamices está compuesta por una base vibratoria sobre la que se disponen los diferentes tamices junto con la bandeja colectora inferior para recoger el polvo de granulometría más fino durante 20 minutos. Dos barras roscadas verticales y una tapa superior aseguran que los tamices no se separan, y unas juntas de goma aseguran la estanqueidad entre tamices. Las diferentes etapas se disponen de tal forma que las de mayor luz se encuentran en la parte superior, atrapando las partículas más grandes, y se va reduciendo a medida que se baja para ir separando las diferentes granulometrías. Para este proyecto solo se han utilizado un corte alto y un corte bajo al rango de diámetros empleado (53 – 150 micras), además de la bandeja colectora, de esta forma se eliminan las partículas demasiado finas o demasiado grandes, pero no se afecta a la distribución de diámetros dentro del rango aceptado.

Limpiadora de ultrasonidos

Para evitar la contaminación cruzada entre ciclos, los tamices se limpian en una limpiadora de ultrasonidos tras cada uso. Esta máquina es en realidad una cubeta llena de etanol en la que se introducen los componentes que se quieren limpiar. Se calienta el etanol y se aplican vibraciones a frecuencias de ultrasonidos que ayudan a separar en este caso el polvo del tamiz, dejándolo listo para el siguiente ciclo.

Sierra metalográfica

Se ha utilizado tanto para extraer los sustratos necesarios para las pruebas como para extraer las probetas para las mediciones de los cordones y los prismas. Estos cortes se realizan mediante un disco de corindón adecuado para cortar superaleaciones de base níquel.

Encapsuladora

El proceso de encapsulado es importante para el análisis de probetas en el microscopio. Consiste en insertar el fragmento que se va a analizar en un cilindro de resina que evita deformaciones en el pulido y facilita a visualización en el microscopio. La resina utilizada es la Warmeinbettmittel EPO, una resina de

baquelita negra que viene en forma de polvo que cura al aplicar presión y calor durante un determinado periodo de tiempo. La máquina utilizada para esto es una encapsuladora Ecopress 102 de la marca Mekton.

Pulidora

Gracias al encapsulado, que normaliza el tamaño de todas las probetas a analizar a cilindros de igual diámetro, el pulido se puede automatizar mediante una pulidora automática, que pule todas las probetas al mismo tiempo de manera uniforme y asegurando que no se afecta al componente durante el pulido. Para ello se aplica presión mediante pistones neumáticos sobre las probetas que se mueven sobre un disco rotativo refrigerado por agua. Aplicando varios ciclos de pulido mediante lijas de grano cada vez más fino a modo de desbaste y algunas pasadas de acabado con paños impregnados por suspensiones de diamante se alcanza el acabado espejo necesario para un correcto análisis en el microscopio.

Microscopios

Se han utilizado dos microscopios durante el proyecto. Las probetas y cordones de referencia se han analizado en un microscopio óptico Leica, que permite obtener fotografías de los detalles que se quieren observar y realizar las medidas necesarias sobre las mismas. El polvo se ha analizado en un microscopio de barrido de electrones (SEM) que además de alcanzar aumentos muy superiores al microscopio óptico, es capaz de medir la composición elemental a nivel local de las muestras.



Figura 10: Equipos utilizados: 1.-Centro DED 2.-Alimentador de polvo 3.-Fuente del láser 4.-Rectificadora 5.-Sierra metalográfica 6.-Limpiadora de ultrasonidos 7.-Torre de tamices 8.-Pulidora 9.-Encapsuladora 10.-Microscopio Leica

1.6 ANÁLISIS DE RIESGOS

Con el objetivo de evitar retrasos durante el desarrollo del proyecto se va a realizar un análisis de riesgos. Para ello, se identifican los principales contratiempos que podrían suceder durante la realización de las pruebas. Estos riesgos se evalúan según la probabilidad de que ocurran y el impacto que tendrían en el proyecto. En base a estos resultados, se clasifican según su relevancia general y se plantean diferentes medidas para evitar que ocurran o reducir su impacto en caso de hacerlo.

Los principales riesgos que podrían encontrarse son los siguientes:

- **Averías en las máquinas y equipos:** Los diferentes equipos utilizados para el estudio podrían sufrir averías que requieran mantenimiento o la sustitución de los mismos, lo que podría dilatar las pruebas en el tiempo. La probabilidad de que esto ocurra es baja, ya que todas las máquinas reciben un mantenimiento periódico y se usan con responsabilidad. Del mismo modo, el entorno en el que se encuentran permite que las reparaciones menores sean por lo general rápidas, por lo que este riesgo no tendría un impacto demasiado importante salvo avería grave.
- **Deterioro del polvo de referencia por causas ajenas a la fabricación:** Como ya se ha explicado, este estudio toma como referencia polvo ya utilizado una vez en una fabricación real anterior al desarrollo de este proyecto. Las conclusiones obtenidas de las pruebas originales se obtienen asumiendo que el polvo se encuentra en el mismo estado que cuando se almacenó. Otros cambios como oxidación, segregación por tamaño de partícula en el bote, cambios en la humedad... que puedan haberse dado en el tiempo que el bote ha estado almacenado podrían distorsionar estos resultados, invalidando las conclusiones obtenidas.
- **Contaminación cruzada:** Debido a la naturaleza del estudio y el entorno en el que se desarrolla, existe la posibilidad de que el polvo se contamine en alguno de los ciclos con muestras de otros ciclos u otros materiales, o que por error se deseche o utilice con otros fines. Manteniendo un procedimiento ordenado y un entorno de trabajo limpio, la probabilidad de que esto ocurra es baja, pero en caso de ocurrir, podría echar por tierra todo el progreso del experimento.

A continuación, se evalúan los riesgos descritos según la siguiente matriz probabilidad-impacto:

Tabla 3: Matriz probabilidad - impacto

		IMPACTO				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
PROBABILIDAD	0,1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
	0,2	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	0,3	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15
	0,4	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2
	0,5	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
RIESGO = PROBABILIDAD * IMPACTO						

En base a esta evaluación, los riesgos a los que se podría enfrentar el proyecto quedan ordenados según muestra la siguiente tabla:

Tabla 4: Clasificación de riesgos

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Relevancia
Averías en máquinas o equipos	0,2	0,2	0,04
Deterioro del polvo	0,1	0,5	0,05
Contaminación cruzada	0,3	0,4	0,12

Se concluye la evaluación de riesgos proponiendo diferentes medidas para prevenir o subsanar cada uno de los riesgos descritos:

- **Averías en máquinas o equipos:** Además del correcto mantenimiento de todas las máquinas e instrumentos por parte de la escuela, se realiza una comprobación general del funcionamiento de todos ellos para detectar posibles averías antes de empezar con las pruebas. En caso de avería repentina de alguno de ellos durante la duración de las pruebas se valorará la gravedad de la situación y se actuará según se considere oportuno, esperando a la reparación o planteando equipos y procedimientos alternativos.
- **Deterioro del polvo:** Para evitar cualquier alteración en la composición o el estado del polvo, este se almacena en un bote hermético con un paquete de sílica gel que absorbe la humedad, manteniendo el polvo seco. Además, gracias a las tolvas calefactadas, se elimina la humedad que haya podido llegar al polvo. Por otro lado, la composición y el estado del primer ciclo se analizan junto con las demás pruebas, lo que permite detectar cambios importantes en el polvo respecto al estado esperado tras una fabricación normal.
- **Contaminación cruzada:** Se etiquetará adecuadamente el polvo en cada ciclo de uso, en botes separados almacenados de manera ordenada. Además, se evitará dejar polvo reutilizado en la tolva para garantizar que no sea desechado o almacenado sin la debida etiqueta por error.

Además de los riesgos para el proyecto, también deben tenerse en cuenta los riesgos para la salud asociados al manejo de los materiales y equipos utilizados durante el proyecto.

Por un lado, el polvo metálico debe manejarse con guantes y mascarilla, para evitar el contacto con heridas y su absorción por la nariz o boca. En caso de intoxicación, el Inconel 718 puede provocar reacciones alérgicas, daños en los órganos, problemas de fertilidad o cáncer. La presencia de polvo con alto contenido en níquel en los pulmones provoca fibrosis pulmonar.

Por otro lado, el láser utilizado es de clase 4, lo que implica que su uso supone un peligro grave. Sin embargo, la máquina al completo se puede considerar de clase 1, ya que no permite que el láser salga del carenado, por lo que, a no ser que se

deshabiliten manualmente los sistemas de seguridad de la máquina, no se requieren medidas de seguridad adicionales.

Además, deben considerarse otros riesgos como intoxicación con ácidos de metalografía o accidentes durante el uso de la sierra metalográfica, la rectificadora o la pulidora.

1.7 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

A continuación, se desarrollan los razonamientos tras algunas decisiones que se han tomado durante el diseño de la metodología que se explica en el apartado siguiente:

1.7.1 Método para la generación del polvo

Durante la fabricación de las probetas de cada ciclo no se genera polvo suficiente para los ciclos posteriores, por lo que se debe proponer un método que permita extraer polvo suficiente en cada ciclo. Para ello, se plantean tres posibles alternativas:

- Fabricación de un componente real: la fabricación de geometrías cercanas a piezas reales afectaría al polvo exactamente de la misma forma que lo haría una fabricación real, por lo que se puede considerar que este método sería el más representativo. Por otro lado, la eficiencia en este caso sería relativamente alta, por lo que haría falta una fabricación considerablemente grande para generar polvo suficiente, especialmente en los primeros ciclos. De esta forma se requiere un volumen inicial de polvo muy grande, y harán falta varias horas de fabricación para completar el estudio, con los consumos que esto supone.
- Fabricación en condiciones desfavorables: como una alternativa más barata a la anterior, se propone la fabricación de piezas que, por su geometría, supongan el desperdicio de un porcentaje de polvo mayor al habitual. Este podría ser el caso del recubrimiento de caras inclinadas o el aporte de paredes delgadas de altura considerable. En este caso se requeriría menos tiempo de fabricación total, ahorrando en costes de proceso y utilizando una menor cantidad de polvo inicial.
- Simulación del proceso de aporte: la tercera opción que se valora para la generación de polvo es la de una técnica que se ha bautizado como "laseado". Esta técnica consiste en activar el polvo y el láser, utilizando una potencia menor a la de fabricación, directamente sobre la bandeja colectora, de tal forma que todas las partículas que interactúan con el láser se recogen para ciclos siguientes. Mediante esta técnica se reduce considerablemente la cantidad de polvo necesaria para el estudio, así como los costes asociados al uso de la máquina durante las pruebas.

Tras valorar las tres posibilidades, se decide utilizar la opción del laseado, por ser la más económica y la más alineada con los objetivos de desarrollo sostenible, ya que supone un menor consumo de polvo, gas y energía.

1.7.2 Selección del polvo utilizado

Para la selección del polvo para las pruebas se presentan dos posibilidades, utilizar polvo nuevo o utilizar sobrantes de fabricaciones independientes al proyecto.

La utilización de polvo completamente nuevo asegura que se parte de polvo en buen estado, siempre que este haya sido conservado adecuadamente hasta su utilización, mientras que al aprovechar polvo gastado se corre un mayor riesgo de deterioro. Además, de esta forma se garantizaría que el deterioro del polvo es consistente entre ciclos; es decir, que el cambio generado entre el estado inicial y el primer ciclo y los cambios entre ciclos los genera el mismo proceso.

Sin embargo, utilizar polvo de una fabricación real permite analizar el estado del polvo tras dicha fabricación, que es muy costosa, permitiendo analizar por un lado el deterioro real en un primer ciclo, y por otro el deterioro progresivo entre ciclos mediante una técnica que genere más polvo, consumiendo menos energía, tiempo y material en cada ciclo. Además, al utilizar polvo que iba a ser desechado igualmente, se contribuye a la sostenibilidad y se ahorran costes.

En base a este razonamiento, se decide realizar el estudio a partir del polvo ya disponible como resultado de una fabricación previa.

1.7.3 Tratamiento del polvo entre ciclos

Por último, se debe seleccionar el tipo de tratamiento que se le va a dar al polvo entre ciclos. Cabe destacar que en esta selección no se considera que ninguna de las opciones planteadas sea mejor que las demás, sino que se trata de tres enfoques diferentes del planteamiento de las pruebas. Se distinguen tres posibles opciones:

- **Reciclado:** definiremos el reciclado del polvo como el conjunto de operaciones necesarias para acercar el polvo lo máximo posible a su estado original, sin añadir polvo nuevo en ningún momento. Una metodología de reciclado requeriría la separación magnética de óxidos y nuevos compuestos generados y la reconstrucción de la distribución de diámetros mediante el tamizado en varios niveles dentro del rango aceptado y la mezcla proporcional de cada uno de ellos.
- **Reacondicionado:** se considerará polvo reacondicionado aquel que ha sido reciclado, pero añadiendo polvo nuevo durante el proceso. De esta forma, se debe realizar la misma separación por diámetros dentro del rango, pero en lugar de coger el polvo necesario de cada uno de los rangos, se coge todo y se corrige la distribución añadiendo polvo nuevo de los diámetros adecuados. Este polvo nuevo también complementa la separación magnética, ya que las partículas oxidadas no separadas supondrán un porcentaje menor sobre el total si se añade polvo nuevo a la mezcla.
- **Reutilizado:** en este caso simplemente se separan las partículas que pueden suponer un problema para la fluidez del polvo, es decir, se alteran la composición y morfología lo mínimo necesario para evitar problemas durante el transporte hasta el meltpool. Para ello, simplemente se tamiza el polvo con tamices de granulometría igual a los límites marcados del rango de diámetros, sin realizar ninguna separación adicional respecto a la composición.

Se decide implementar la tercera opción, el reutilizado, ya que se trata de la opción más desfavorable en cuanto a los resultados que se pueden esperar. De esta forma, cualquier conclusión obtenida se considerará que está del lado de la seguridad. Además, esta es la opción que menos operaciones y menor consumo total de polvo requiere, por lo que se trabaja una vez más en el marco de la sostenibilidad y el ahorro económico.

1.8 SOLUCIÓN PROPUESTA

A continuación, se muestra un resumen de la metodología propuesta para el desarrollo del experimento, que está basada en la repetición de manera cíclica de una serie de procedimientos, que quedan resumidos en el siguiente diagrama:

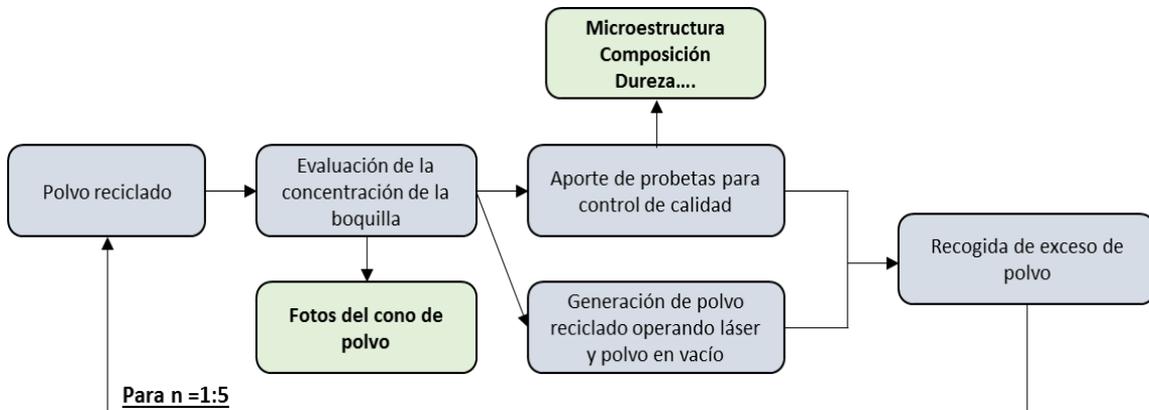


Figura 11. Diagrama simplificado de propuesta de ensayos.

Con el fin de evaluar la influencia del empleo de polvo reciclado en la calidad de piezas aportadas por LMD, se plantea como variable del diseño el número de ciclos de reciclaje por los que ha pasado el polvo metálico. Con este fin, se valoran hasta cinco ciclos de reciclaje. Para evaluar la calidad de los aportes realizados se fabrican dos probetas de dimensiones $15 \times 15 \times 3 \text{ mm}^3$, junto con un cordón de referencia, sobre un sustrato de acero AISI 1045 para cada caso estudiado, es decir, polvo reciclado desde 1 hasta 5 ciclos. La estrategia empleada para el aporte será de zig-zag en direcciones alternas (x e y) y con perímetro en capas alternas. De estas probetas se extraerán muestras para un posterior análisis metalográfico. Previamente se sacarán fotos del cono de polvo para evaluar la capacidad de la boquilla para concentrarlo.

Con el fin de generar suficiente exceso de polvo y presumiendo que durante el aporte de las dos probetas no se va a lograr dicho volumen, se plantea obtenerlo mediante el proceso de laseado.

El reciclaje de polvo metálico, que se da entre ciclos, consta de dos partes, la colección o recogida del mismo durante el proceso de aporte, y su tamizado para eliminar agrupaciones de partículas que se hayan generado durante el proceso de L-DED y partículas excesivamente pequeñas que puedan afectar negativamente a la fluidez. En definitiva, el objetivo es que la granulometría del polvo reutilizado se encuentre dentro de los límites establecidos por el fabricante.

Para la recolección del material, se emplea una bandeja metálica que recoge el exceso de polvo que no se introduce en el baño fundido durante el proceso de aporte. El sustrato sobre el cual se fabrican las probetas se coloca sobre la bandeja, que ha de ser lo suficientemente amplia como para garantizar la recogida de la mayor parte del polvo sobrante. El material recogido de esta forma será tamizado para los ciclos posteriores.

2 METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DE FASES, EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS

2.1.1 Cono de polvo

El cono de polvo se analiza mediante imágenes directas del polvo saliendo por la boquilla. Para ello, se activan tanto el gas de arrastre como el de protección, ya que la forma del cono viene determinada por ambos. Los materiales necesarios para la obtención de estas imágenes son una cámara de alta calidad, para captar adecuadamente la trayectoria de las partículas a alta velocidad, y una linterna para resaltar dichas partículas en la imagen.

Mediante este análisis se busca encontrar inestabilidades en el caudal de polvo o formas de cono anormales que indiquen cambios en la fluidez del polvo. Estas variaciones pueden traducirse en malas distribuciones de polvo en el spot del láser y pérdidas de eficiencia en el aporte, lo que afectaría a las dimensiones y la integridad del cordón. Se busca una forma de doble cono que genere un estrechamiento sin demasiada dispersión, a una distancia de 15mm desde la boquilla. Durante la obtención de las fotos también se controla que la forma del cono sea estable en el tiempo, sin parpadeos ni oscilaciones.

2.1.2 Fabricación y análisis de probetas

Para cada ciclo se fabricarán dos prismas de 6 capas de 15x15 mm y un cordón de referencia. Previamente, se deben preparar sustratos de Aisi 1045 de 55x70 que se rectifican por ambas caras para asegurar su paralelismo y planitud, de tal forma que la distancia entre la boquilla y la pieza y el acabado superficial sean constantes. En cada una de estas placas se fabricarán dos ciclos de reciclado, según se indica en la figura:

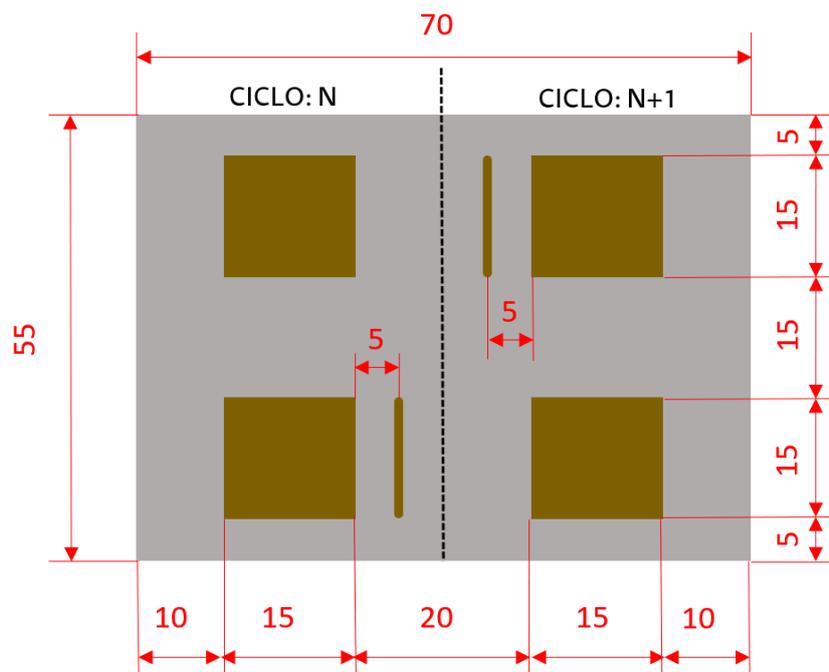


Figura 12: Esquema de la fabricación de las probetas

2.1.3 Generación de polvo afectado por el calor mediante laseado

Como ya se ha explicado, durante la fabricación de las probetas no se genera polvo suficiente como para llevar a cabo las iteraciones posteriores, por lo que utilizaremos el método del laseado. Para ello, se activan el láser y el polvo simultáneamente en vacío, es decir, sin enfocar el proceso en una superficie de trabajo. Para evitar dañar la bandeja colectora, el laseado se realiza en ciclos de 30 segundos, moviendo el cabezal para evitar acumulaciones de calor y poniendo bloques de acero sobre la bandeja para absorber el láser. En la siguiente figura se muestra un esquema del proceso:

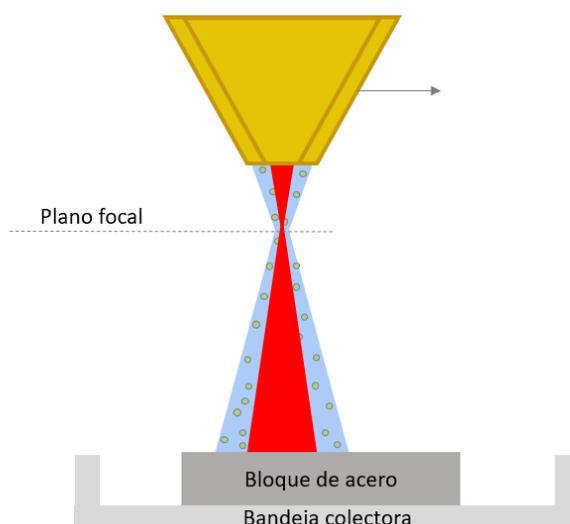


Figura 13: Esquema del proceso de laseado

2.1.4 Recogida del polvo

Tanto el polvo sobrante de la fabricación como el generado durante el laseado se depositan sobre la bandeja colectora. Esta bandeja debe ser limpiada con alcohol antes de cada ciclo para evitar la contaminación cruzada con polvo de otros ciclos u otras pruebas realizadas en la máquina en paralelo a estas. Una vez finalizados ambos procesos, se transfiere el polvo a un bote hermético adecuado para su almacenaje hasta el siguiente ciclo de tamizado.

2.1.5 Tamizado y selección de partículas de granulometría adecuada

Al terminar cada ciclo, se tamiza el polvo para eliminar partículas demasiado finas o demasiado grandes, ajustando la granulometría a la original. La columna de tamices, que se representa esquemáticamente en la figura 13, está compuesta por dos tamices y un contenedor para la recogida de polvo más fino. El polvo se introduce por la parte superior de la columna y se activa la tamizadora electromagnética, que aplica vibraciones de alta frecuencia al sistema, durante al menos 20 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, se recoge el polvo retenido en el tamiz más fino, es decir, el polvo cuya granulometría está entre 0.053 mm y 0.150 mm, se extrae una pequeña muestra para su análisis en el SEM y se almacena para el siguiente ciclo.

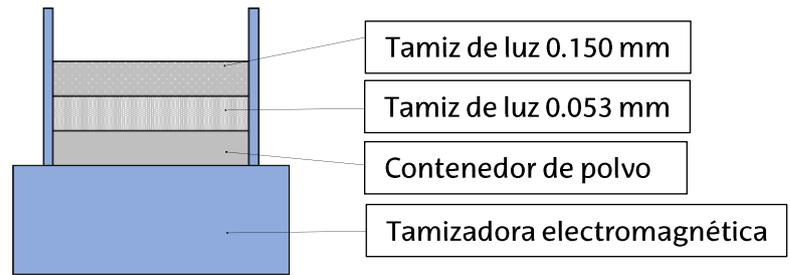


Figura 14. Disposición de la columna de tamices.

Para evitar la contaminación cruzada entre ciclos, el contenedor inferior se limpia con alcohol tras cada ciclo y los tamices se introducen durante 20 minutos en la limpiadora de ultrasonidos.

2.1.6 Análisis de resultados

El procedimiento para el análisis de los cordones y los prismas es el siguiente: se extrae la sección que se quiere analizar mediante la sierra metalográfica, se encapsula la probeta para poder introducirla en la pulidora, se pule siguiendo un orden decreciente de tamaño de grano de lijas seguidas de paños de suspensiones de diamante y finalmente se introducen en el microscopio óptico Leica para obtener las imágenes y realizar las medidas correspondientes.

Para el análisis del polvo, este se adhiere a unas bases circulares como las que se ven en la figura siguiente, preparadas para ser introducidas en el SEM donde se extraen las imágenes necesarias para el estudio morfológico del polvo y se realiza un análisis composicional mediante EDX.

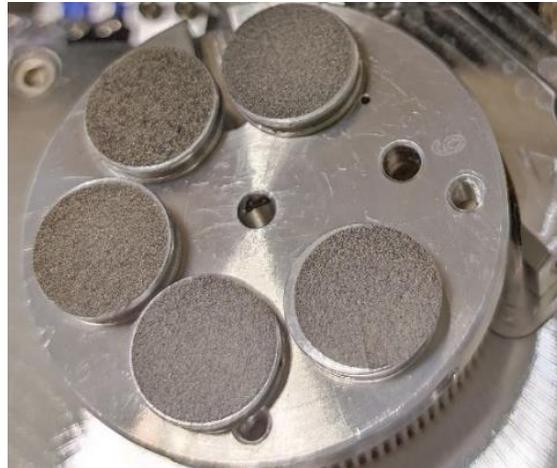


Figura 15: Muestras de polvo para análisis en el SEM

2.2 PLAMIFICACIÓN

2.2.1 Fases del proyecto

- Revisión del estado del arte

En esta fase inicial se hace una búsqueda de publicaciones y estudios en la línea del reciclado de polvo en fabricación aditiva. El objetivo de esta fase es ampliar conocimiento en los campos relacionados con el proyecto, como la defectología del polvo y su relación con el resultado de la fabricación, así como buscar estudios similares realizados previamente.

- Desarrollo de experimentos

Previamente al desarrollo de las pruebas propiamente dichas debe plantearse la metodología seguida en las mismas, ya descrita en los apartados anteriores.

El primer paso para el desarrollo del experimento consiste en la preparación de los equipos y materiales necesarios. Como ya se ha explicado, antes de cada ciclo deben limpiarse los tamices en la limpiadora de ultrasonidos, para eliminar cualquier resto de polvo de ciclos anteriores que contamine las muestras. También debe eliminarse cualquier resto de polvo de la tolva y la bandeja colectora, y preparar los botes necesarios para una correcta clasificación de las muestras recogidas. Además, se deben rectificar los sustratos, para garantizar el paralelismo entre sus caras.

Una vez preparados todos los instrumentos necesarios, se pone en práctica la metodología planteada, tomando las precauciones necesarias para evitar la contaminación cruzada y documentando los experimentos adecuadamente.

- Análisis de resultados

Tras la finalización de los aportes se cortan las pruebas con la sierra metalográfica, con el objetivo de extraer las probetas necesarias para el análisis dimensional y metalográfico de las mismas. Por otro lado, se envían las muestras de polvo al CFAA para analizarlas en el SEM.

- Validación del ensayo

En vista de los resultados obtenidos en las pruebas, se considera necesario llevar a cabo un análisis adicional, en el que se busca comparar el efecto en polvo nuevo de un proceso de aporte real, con el laseado según se ha planteado (300W) y a la potencia real de fabricación (600W). En este caso solamente se conducirá en análisis en el SEM de los tres casos tanto tamizados como sin tamizar.

- Redacción de la documentación

Una vez finalizado la parte práctica del proyecto, analizados los resultados y extraídas las conclusiones, se debe redactar toda la documentación correspondiente al proyecto.

2.1.2 Diagrama de Gantt

Las tareas descritas se organizan de manera secuencial según el siguiente diagrama de Gantt:

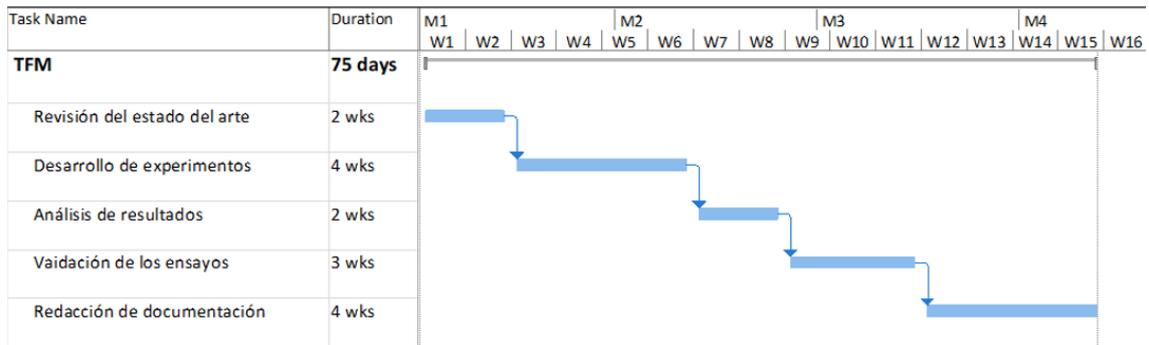


Figura 16: diagrama de Gantt del proyecto

2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados se plantea de la siguiente forma. Se comenzará analizando para cada ciclo la forma y dimensiones del cono de polvo, un corte metalográfico del cordón y otro del prisma de 6 capas y la composición y morfología del polvo una vez tamizado. Para ello se compararán los resultados con los obtenidos en el cordón tomado como referencia. Cabe destacar que este cordón se caracterizó utilizando Inconel 718 como sustrato, así que cabría esperar diferencias, especialmente en la unión entre materiales. En la siguiente imagen puede verse la fabricación de uno de los ciclos, donde se indica la posición del corte metalográfico.

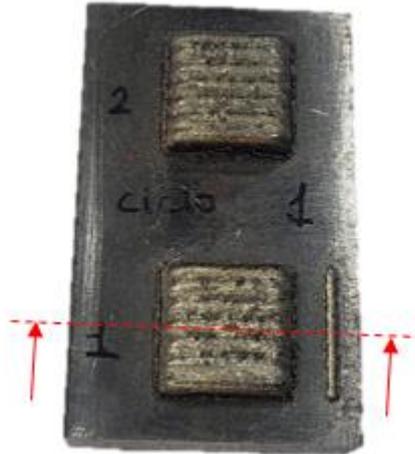


Figura 17: Resultado de una fabricación

La siguiente tabla resume los parámetros utilizados y los resultados obtenidos con los mismos:

Tabla 5: Resumen de los parámetros de referencia

Parámetros de proceso						
Parámetro	Potencia	Velocidad	Flujo de polvo	Solape	Caudal de arrastre	Caudal de protección
Unidades	W	mm/min	g/min	%	l/min	l/min
Valor	600	525	5.5	35	4	5
Medidas del cordón						
Parámetro	Altura	Anchura	Penetración en el sustrato	Angulo de mojado	Dilución	Relación de aspecto
Unidades	mm	mm	mm	°	(-)	(-)
Valor	0.422	1.628	0.138	47	0.246	4

El cordón de referencia presenta una dilución muy cercana a lo establecido según la referencia [7] pero la relación de aspecto es ligeramente mayor, lo que indica un cordón relativamente plano. El ángulo de mojado se ajusta a lo considerado deseable.

Igualmente, se presentan a continuación los resultados obtenidos en el SEM al analizar el polvo virgen, del mismo lote de fabricación que el utilizado en dichas pruebas de referencia:

Tabla 6: Composición del polvo de referencia

Ciclo	0
Ni	48,99
Cr	24,06
Fe	20,1
O	4,09
Al	1,07
Nb	0,77
Mo	0,01
Ti	0,91

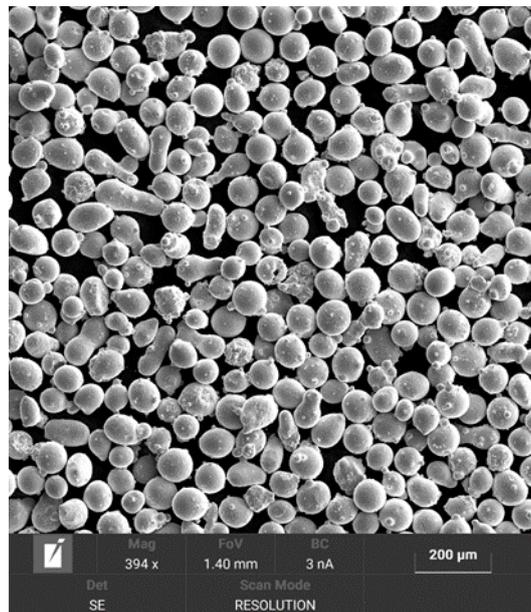


Figura 18: Morfología del polvo virgen.

Como se puede observar, el polvo virgen ya presenta una cantidad no despreciable de partículas deformadas, oxidadas (aquellas con bordes irregulares) y un gran número de satélites. Respecto a la composición, vemos que ya hay presencia de oxígeno, y que los porcentajes del resto de elementos, aunque cercanos, se salen en algunos casos de los rangos establecidos para el Inconel 718, lo que indica una mala conservación del polvo, una mala calidad de fabricación, o ambas.

Finalmente, se presenta un resumen de los resultados analizando su evolución con los ciclos de reciclado.

2.3.1 Informe de resultados del ciclo 1

Análisis de cordones simples

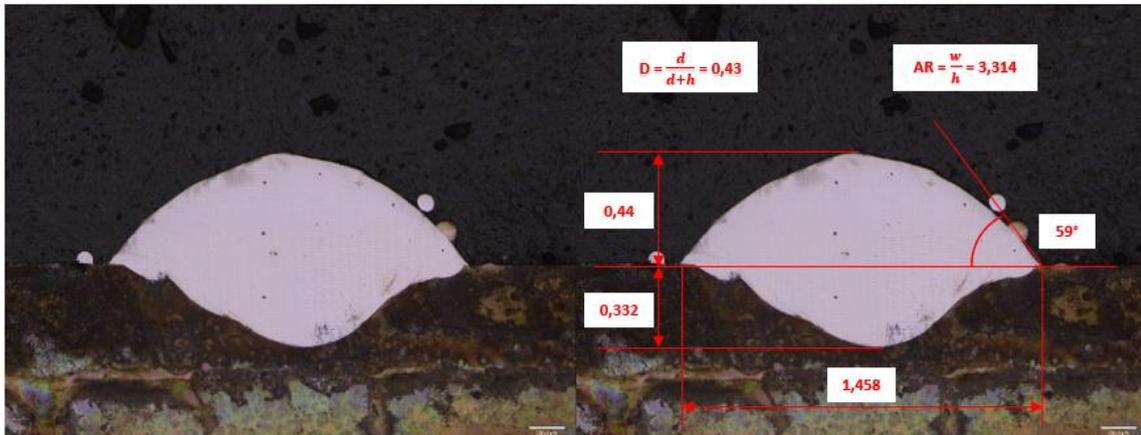


Figura 19: Ciclo 1 - Cordón

Comparando las dimensiones del cordón del primer ciclo con las de referencia, observamos que la altura del cordón es la misma, pero la anchura es menor y tanto la penetración en el sustrato como el ángulo de mojado son mayores. Esto podría explicarse la siguiente forma, el acero utilizado es más sensible al láser que el Inconel 718, por lo que la dilución es considerablemente mayor, lo que genera un menor tamaño para el cordón para el mismo flujo de polvo, debido a que una mayor cantidad de material aportado se encuentra bajo la superficie. Al mismo tiempo, la diferencia en la afinidad entre materiales genera ángulos de mojado mayores, dotando al cordón de un aspecto más redondeado. El resultado es un cordón más estrecho, pero el decrecimiento en altura generado por la mayor dilución se compensa con el aumento generado por el ángulo de mojado. Se observa porosidad no despreciable dentro del cordón.

Análisis de bloques generados por superposición de capas

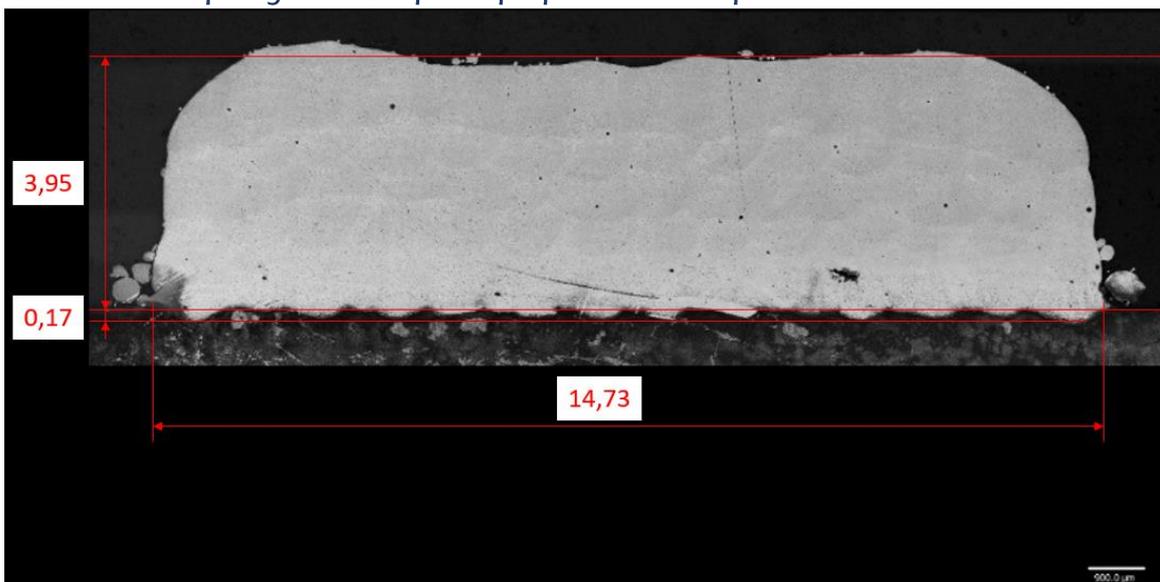


Figura 20: Ciclo 1 - Prisma

La dilución del prisma del primer ciclo es menor que la del cordón. Por otro lado, la mayor altura del mismo respecto a lo esperado (3 mm) y la falta de fusión presente

entre las capas 1 y 2 indican que el solape no es el adecuado para el cordón empleado. Esto se debe en parte a que, debido al ancho de cordón real menor al esperado, el solape real empleado es menor al calculado. Además, el alto ángulo de mojado supone un obstáculo a la hora de solapar adecuadamente los cordones. La presencia de poros en el cordón también se ve reflejada en el prisma.

Análisis de la granulometría y morfología del polvo



Figura 21: Ciclo 1 - Cono de polvo

El cono de polvo no muestra irregularidades ni fluctuaciones. La concentración en el estrechamiento parece adecuada, sin excesiva dispersión. Podemos concluir que el polvo fluye adecuadamente por la boquilla.

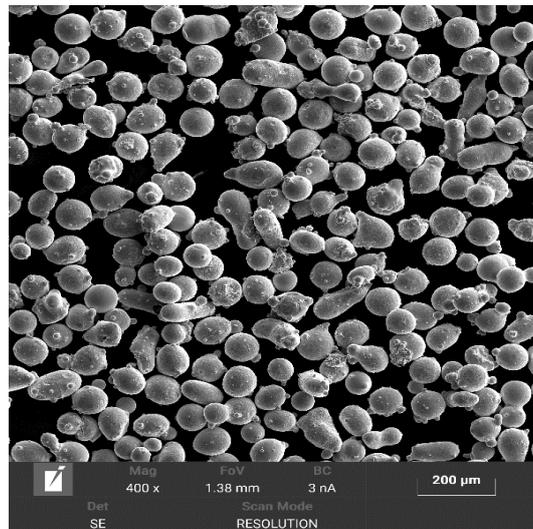


Figura 22: Ciclo 1 - Morfología del polvo

La figura 16 muestra que, respecto al polvo de referencia, la cantidad de partículas deformadas y oxidadas ha aumentado, al igual que el número de satélites adheridos a las mismas. Debe tenerse en cuenta que la muestra se ha obtenido después del tamizado, por lo que se puede asumir que la cantidad de óxidos generada por la interacción con el láser sea incluso mayor.

Tabla 7: Ciclo 1 – Composición (%wt)

Ciclo	0	1
Ni	48,99	43,33
Cr	24,06	20,95
Fe	20,1	19,7
O	4,09	8,34
Al	1,07	0,9
Nb	0,77	3,78
Mo	0,01	1,94
Ti	0,91	0,63
W	0	0,42
Co	0	0

Se pueden observar diferencias importantes en la composición entre las muestras. Se observa un aumento considerable del porcentaje de oxígeno debido al aumento de partículas oxidadas. Las concentraciones de niobio y molibdeno parecen aumentar considerablemente, lo cual no parece tener demasiado sentido, probablemente se deba a que en alguno de los dos casos la muestra presentaba una concentración anormal de alguno de los elementos. Esto afecta al resto de porcentajes, que parecen bajar debido a la mayor presencia de estos dos elementos. La aparición de tungsteno en el polvo no cuadra con la composición esperada, por lo que se concluye que podría tratarse de impurezas introducidas al material mediante contaminación cruzada a través de la tolva, el camino del polvo o la bandeja.

2.3.2 Informe de resultados del ciclo 2

Análisis de cordones simples

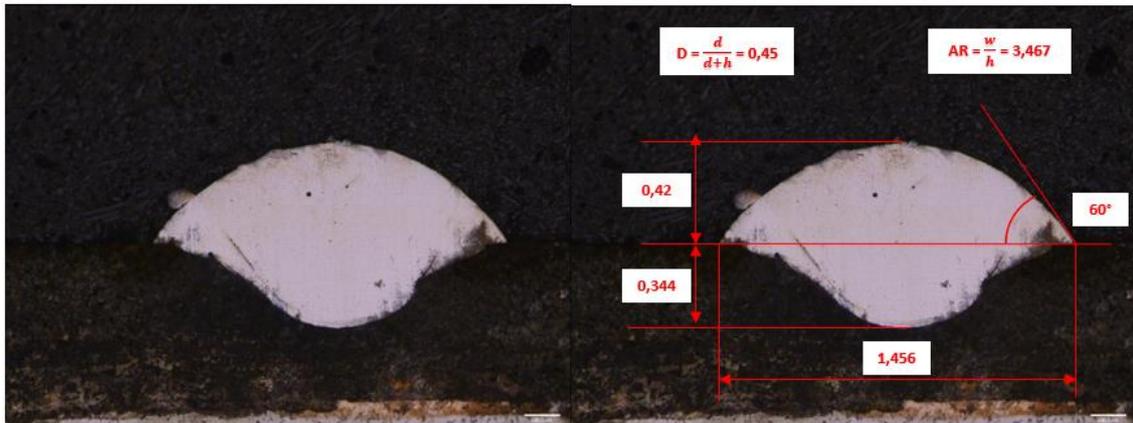


Figura 23: Ciclo 2 - Cordón

Los resultados obtenidos para el cordón del segundo ciclo son muy similares a los del primero, no se aprecian cambios relevantes en ninguna de las dimensiones medidas ni en la forma y aspecto general del cordón. En este caso también se puede observar la presencia de poros de gas atrapados en el cordón.

Análisis de bloques generados por superposición de capas

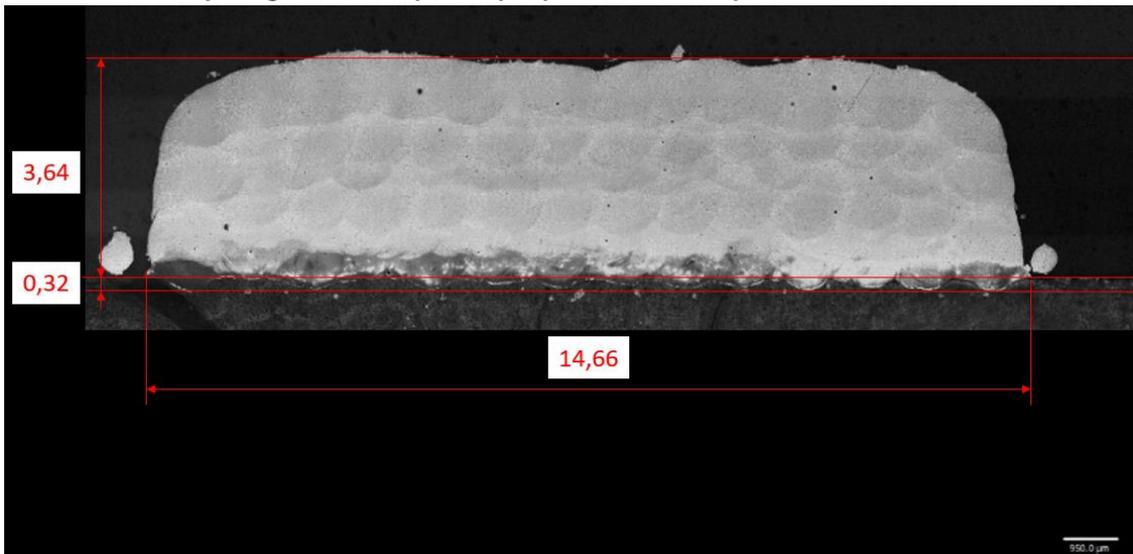


Figura 24: Ciclo 2 - Prisma

En el segundo ciclo, el prisma presenta una anchura similar a la del anterior, pero la penetración en el sustrato es algo mayor a la anterior, asemejándose a la del cordón, y la altura es algo menor. Una posible explicación es que los cordones de la primera capa del primer ciclo hayan crecido más al tener una menor dilución, por lo que la altura del prisma es finalmente algo superior. En este caso también puede observarse la presencia de porosidad en el prisma.

Análisis de la granulometría y morfología del polvo



Figura 25: Ciclo 2 - Cono de polvo

El cono de polvo no muestra irregularidades ni fluctuaciones. La concentración en el estrechamiento parece algo menor al ciclo anterior, pero no es excesiva. Igualmente, podemos concluir que el polvo fluye adecuadamente por la boquilla.

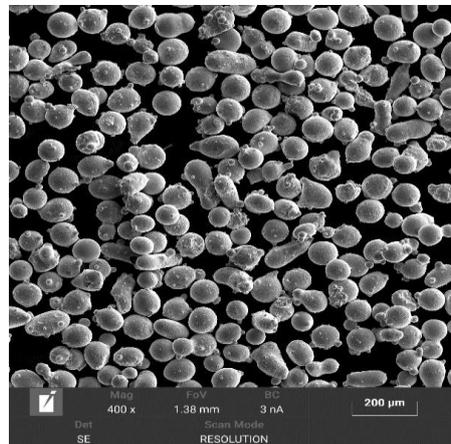


Figura 26: Ciclo 2 - Morfología del polvo

La morfología del polvo no presenta diferencias excesivas con el del primer ciclo, lo que podría indicar que el polvo puede reciclarse al menos dos ciclos sin mayor problema, o que el laseado no es representativo de la realidad.

Tabla 8: Ciclo 2 – Composición (%wt)

Ciclo	0	1	2
Ni	48,99	43,33	42,78
Cr	24,06	20,95	20,93
Fe	20,1	19,7	19,59
O	4,09	8,34	9,31
Al	1,07	0,9	0,91
Nb	0,77	3,78	3,68
Mo	0,01	1,94	1,81
Ti	0,91	0,63	0,6
W	0	0,42	0,38
Co	0	0	0

La composición del polvo también es muy similar a la del ciclo anterior, lo que apoya las hipótesis planteadas.

2.3.3 Informe de resultados del ciclo 3

Análisis de cordones simples

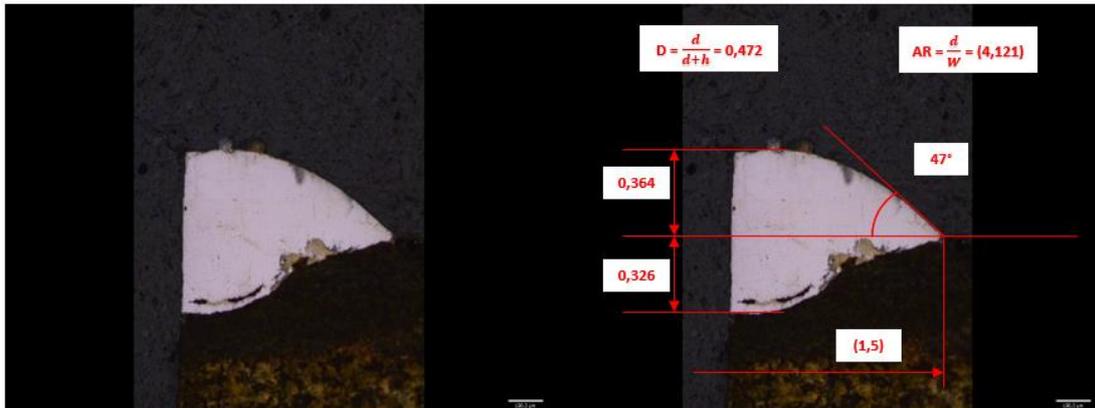


Figura 27: Ciclo 3 - Cordón

El cordón de referencia del ciclo 3 fue dañado, por lo que no puede hacerse la medición de su anchura. Afortunadamente, pueden distinguirse los puntos de mayor y menor altura, por lo que sí pueden medirse la altura y la dilución, y se puede estimar que la anchura del cordón rondara el milímetro y medio, con lo que puede obtenerse también un valor orientativo para la relación de aspecto. La altura de este cordón es notablemente inferior a los anteriores, muy similar a la penetración en el sustrato. El ángulo de mojado también ha disminuido notablemente, lo que le da al cordón un aspecto más adecuado para ser solapado, aunque con demasiada dilución. En este caso no se observan poros en el corte.

Análisis de bloques generados por superposición de capas

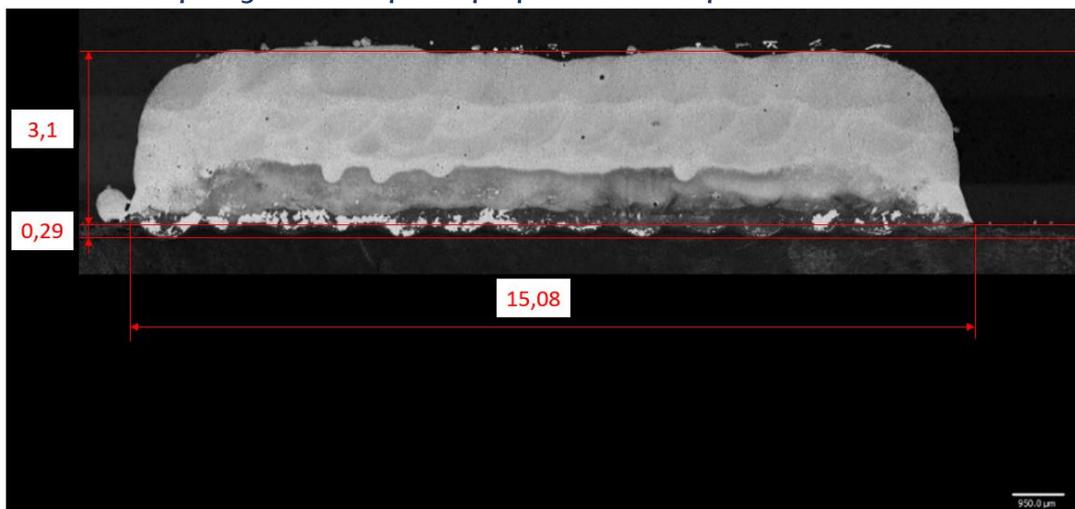


Figura 28: Ciclo 3 - Prisma

Los cambios observados en el cordón también se ven reflejados en el prisma, que presenta una anchura ligeramente superior y una altura inferior a los anteriores. En cuanto a los diferentes colores que se aprecian en el corte, se deben probablemente a un ataque químico irregular en el que las primeras capas han estado más tiempo expuestas al reactivo que el resto. La porosidad en el prisma se mantiene.

Análisis de la granulometría y morfología del polvo



Figura 29: Ciclo 3 - Cono de polvo

El aspecto del cono de polvo es muy similar a los anteriores, el polvo sigue fluyendo adecuadamente a través de la boquilla.

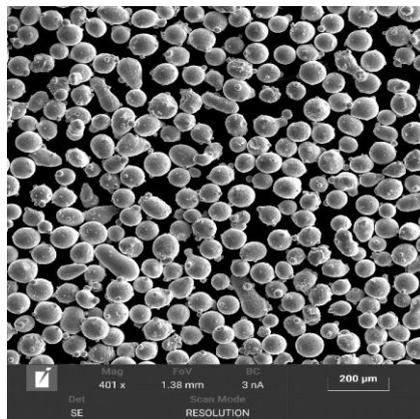


Figura 30: Ciclo 3 - Morfología del polvo

Con los resultados obtenidos, no se puede observar una tendencia clara en la morfología del polvo.

Tabla 9: Ciclo 3 - Composición

Ciclo	0	1	2	3
Ni	48,99	43,33	42,78	46,1
Cr	24,06	20,95	20,93	19,96
Fe	20,1	19,7	19,59	18,8
O	4,09	8,34	9,31	3,79
Al	1,07	0,9	0,91	1,49
Nb	0,77	3,78	3,68	4,88
Mo	0,01	1,94	1,81	3
Ti	0,91	0,63	0,6	0,88
W	0	0,42	0,38	1,03
Co	0	0	0	0

La composición del polvo también en este caso sí sufre algunas variaciones apreciables, aunque podría deberse a la incertidumbre derivada del muestreo, ya que se aprecia un aumento considerable en el tungsteno. Aun así, teniendo en cuenta el cambio dimensional del cordón, podría tratarse de un cambio en cuanto a la formación de las diferentes fases del Inconel 718.

2.3.4 Informe de resultados del ciclo 4

Análisis de cordones simples

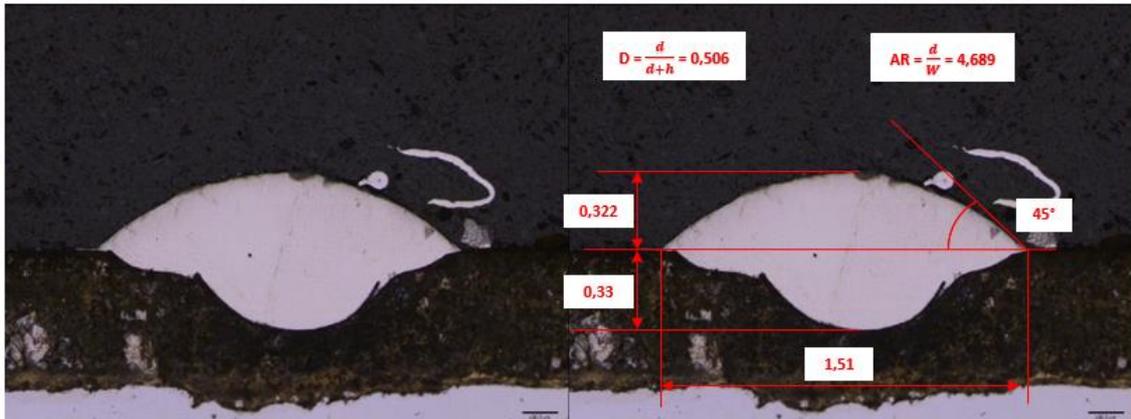


Figura 31: Ciclo 4 - Cordón

Las dimensiones del cuarto cordón parecen confirmar la tendencia que se observaba con el tercero, la altura ha decrecido hasta ser incluso menor que la penetración, y el ancho y el ángulo de mojado se mantienen en torno a 1,5mm y 45°, respectivamente. Los parámetros de dilución y de relación de aspecto se encuentran muy fuera del rango considerado óptimo. La porosidad parece tender a disminuir.

Análisis de bloques generados por superposición de capas

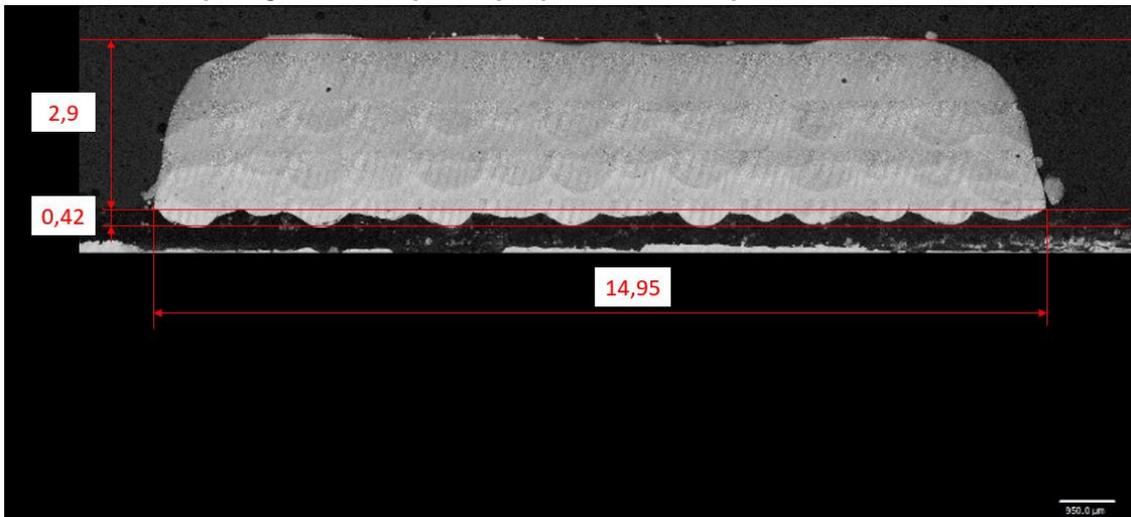


Figura 32: Ciclo 4 - Prisma

El prisma también sigue en este caso la misma tendencia que el cordón. Con una altura menor que la anterior pero una anchura similar. La porosidad también parece haber disminuido ligeramente, pero podría deberse a que se ha cortado por una sección con menos poros que el resto de la probeta.

Análisis de la granulometría y morfología del polvo



Figura 33: Ciclo 4 - Cono de polvo

El cono de polvo se ha mantenido muy similar en los cuatro primeros ciclos, parece que el tamizado empleado es suficiente para garantizar una correcta fluidez.

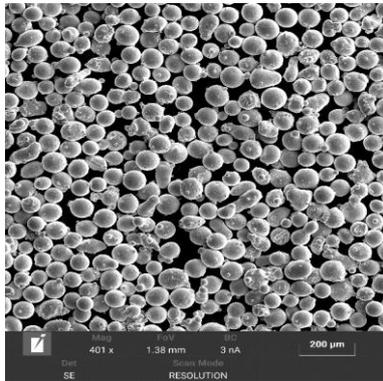


Figura 34: Ciclo 4 - Morfología del polvo

La morfología del polvo se mantiene similar a los ciclos anteriores, con abundancia de partículas deformadas, oxidadas y con satélites.

Tabla 10: Ciclo 4 - Composición

Ciclo	0	1	2	3	4
Ni	48,99	43,33	42,78	46,1	44,5
Cr	24,06	20,95	20,93	19,96	20,84
Fe	20,1	19,7	19,59	18,8	18,85
O	4,09	8,34	9,31	3,79	5,9
Al	1,07	0,9	0,91	1,49	1,09
Nb	0,77	3,78	3,68	4,88	4,19
Mo	0,01	1,94	1,81	3	2,32
Ti	0,91	0,63	0,6	0,88	0,72
W	0	0,42	0,38	1,03	0,6
Co	0	0	0	0	0,96

La composición del polvo se vuelve a acercarse en este caso a la de los dos primeros ciclos, lo que no revela demasiada información respecto a lo sucedido. En este ciclo ha aparecido por primera vez el cobalto. Esto puede ser por dos causas, se trata de una impureza que se ha introducido al sistema en este cuarto ciclo, o se encuentra en una concentración muy baja y hasta ahora no había sido detectado.

2.3.5 Informe de resultados del ciclo 5

Análisis de cordones simples

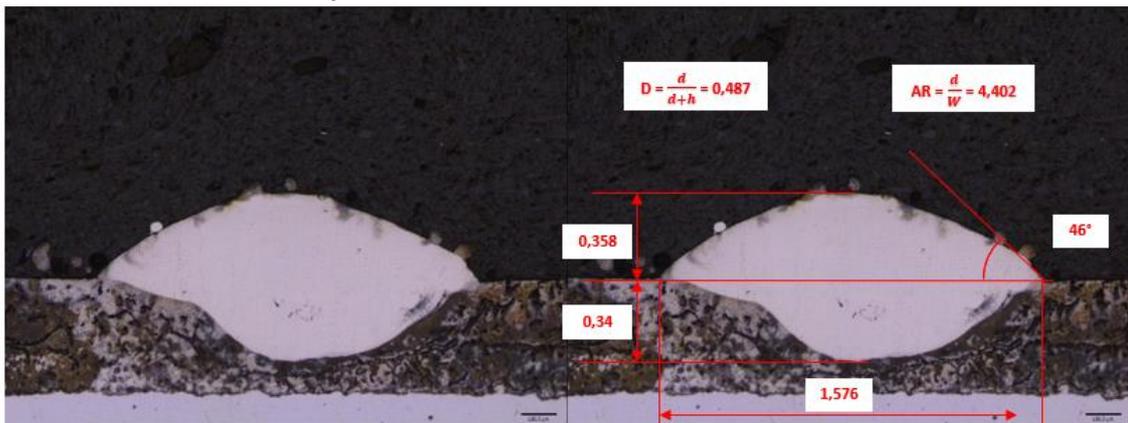


Figura 35: Ciclo 5 - Cordón

El quinto cordón vuelve a tener un aspecto similar a los dos anteriores, con una dilución del 50% y una relación de aspecto grande, pero con un ángulo de mojado aceptable.

Análisis de bloques generados por superposición de capas

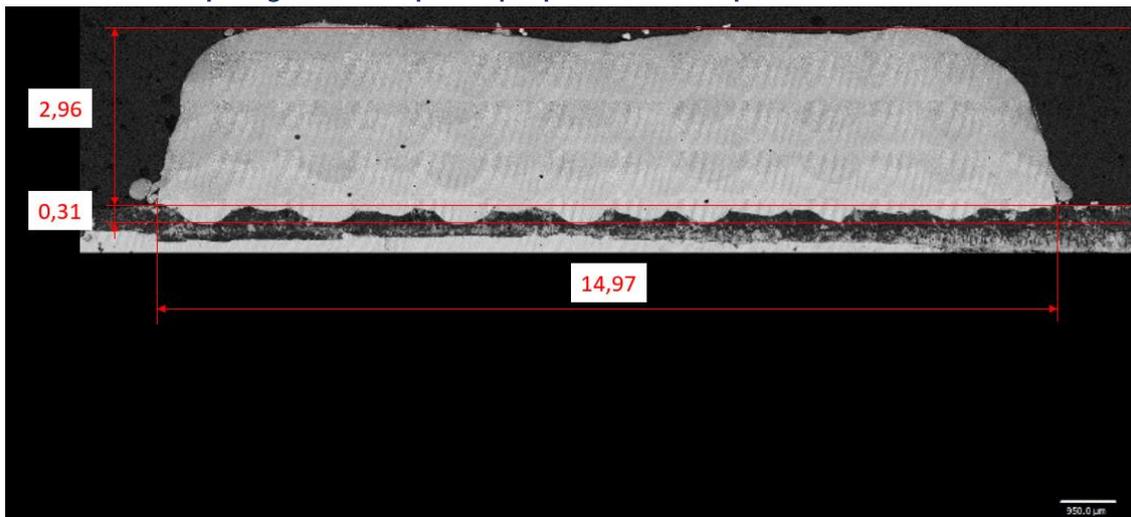


Figura 36: Ciclo 5 - Prisma

Las dimensiones del prisma también concuerdan con las de los dos anteriores, aunque en este caso vuelve a aumentar la porosidad. En base a estos datos, no puede asegurarse una tendencia en cuanto a la porosidad con el avance de los ciclos.

Análisis de la granulometría y morfología del polvo



Figura 37: Ciclo 5 - Cono de polvo

La fluidez del polvo parece correcta también en este último ciclo, los conos de polvo han resultado muy similares en todas las mediciones realizadas.

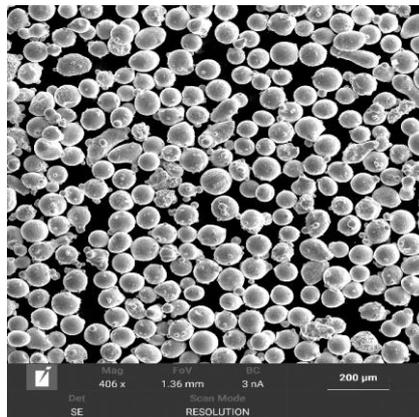


Figura 38: Ciclo 5 - Morfología del polvo

Una vez más, no se aprecian cambios claros en la morfología del polvo entre los ciclos 4 y 5.

Tabla 11: Ciclo 5 - Composición

Ciclo	0	1	2	3	4	5
Ni	48,99	43,33	42,78	46,1	44,5	44,13
Cr	24,06	20,95	20,93	19,96	20,84	20,79
Fe	20,1	19,7	19,59	18,8	18,85	19,37
O	4,09	8,34	9,31	3,79	5,9	6,66
Al	1,07	0,9	0,91	1,49	1,09	1,12
Nb	0,77	3,78	3,68	4,88	4,19	4,24
Mo	0,01	1,94	1,81	3	2,32	2,35
Ti	0,91	0,63	0,6	0,88	0,72	0,73
W	0	0,42	0,38	1,03	0,6	0,61
Co	0	0	0	0	0,96	0

La composición del polvo es bastante similar a las de los casos anteriores. Cabe destacar la desaparición del cobalto, que solo se ha detectado en el cuarto ciclo. Esto indicaría que o bien se trata de un error de medición en el SEM, o se encuentra muy concentrado únicamente en algunos granos, y solo se ha introducido algún grano con cobalto en la medición del ciclo 4.

2.3.6 Resumen de los cinco ciclos

Tabla 12: Resumen de dimensiones de los cordones.

Ciclo	Ref.	Reciclado 1	Reciclado 2	Reciclado 3	Reciclado 4	Reciclado 5
h (mm)	0.422	0,44	0,42	0,364	0,322	0,358
d (mm)	0.138	0,332	0,344	0,326	0,33	0,34
w (mm)	1.628	1,458	1,456	(1,5)	1,51	1,576
θ (°)	47	59	60	47	45	46
D (-)	0.246	0,43	0,45	0,472	0,506	0,487
AR (-)	4	3,314	3,467	(4,121)	4,689	4,402

Durante los dos primeros ciclos, la altura del cordón es la misma que la de referencia, pero la anchura es menor y la penetración en el sustrato y el ángulo de mojado mayores. A partir del tercer ciclo, la altura baja drásticamente hasta igualarse con la penetración, que se mantiene invariante con los ciclos. La anchura tiende a aumentar según disminuye la altura, y el ángulo de mojado disminuye, dando como resultados cordones más planos.

Tabla 13: Resumen de dimensiones de los prismas.

Ciclo	Reciclado 1	Reciclado 2	Reciclado 3	Reciclado 4	Reciclado 5
h (mm)	3,95	3,64	3,1	2,9	2,96
d (mm)	0,17	0,32	0,29	0,42	0,31
w (mm)	14,73	14,66	15,08	14,95	14,97

La tendencia detectada en los cordones respecto a las dimensiones se ve reflejada en los prismas, con un aumento en la anchura y una disminución en la altura a partir del tercer ciclo, manteniendo una dilución relativamente constante.

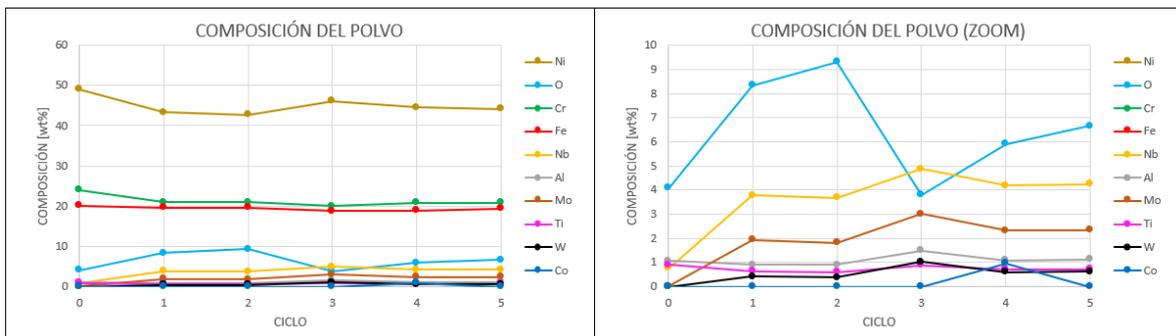


Figura 39: Resumen de composiciones

Pese a algunas variaciones, no se puede afirmar que exista una tendencia clara en ninguno de los elementos en cuanto a la concentración. Tampoco se han observado cambios importantes en el cono de polvo ni en la morfología del mismo.

En base a estos resultados se decide realizar una validación de la metodología, cogiendo polvo nuevo y comparando muestras con y sin tamizar de tres situaciones: fabricación real, laseado según los ensayos anteriores (300W) y laseado a la potencia real (600W).

2.3.7 Validación de la metodología

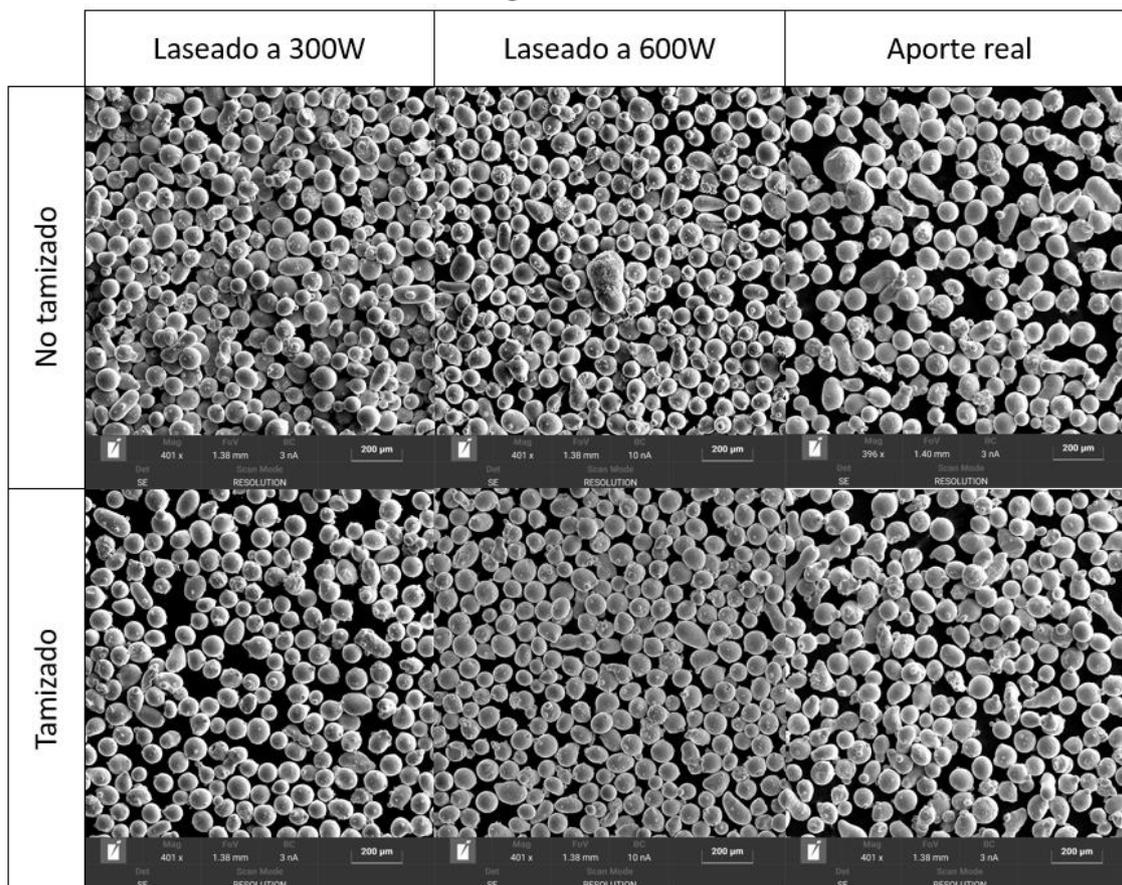


Figura 40: Validación de la metodología - morfología del polvo

Analizando la morfología en estos casos, vemos que en los tres casos aparecen partículas oxidadas, deformadas y con satélites tanto antes como después del tamizado, de manera más abundante que en el polvo de referencia. En los casos de aporte real y laseado a 600W aparecen además partículas más grandes y cúmulos de partículas que no son tan evidentes en el caso del laseado a 300W. Tras el tamizado los tres casos son indistinguibles.

Los gráficos de la figura 39 muestran para cada elemento la evolución en cada uno de los tres casos analizados del polvo en su paso de polvo virgen (1), a procesado sin tamizar (2), y finalmente tamizado (3).

Para el níquel, el hierro y el cromo se ve claramente como el laseado a 300W tiene un efecto pequeño en las concentraciones, y el aporte real se encuentra a medio camino entre este caso y el de 600W.

En el caso del oxígeno la tendencia es similar, con impactos más notables para el aporte real y el laseado a 600W, pero encontramos variaciones muy grandes tras el tamizado. Se sospecha que la influencia del tamaño de muestra al analizar la composición está influyendo en los compuestos menos abundantes, ya que unos pocos granos muy ricos en dichos elementos pueden distorsionar enormemente las medidas. Esta teoría se respalda al analizar las concentraciones de los cuatro elementos restantes, cuyos parecen más aleatorios según se disminuye la presencia media del elemento. En ninguno de los casos se ha encontrado cobalto o tungsteno.

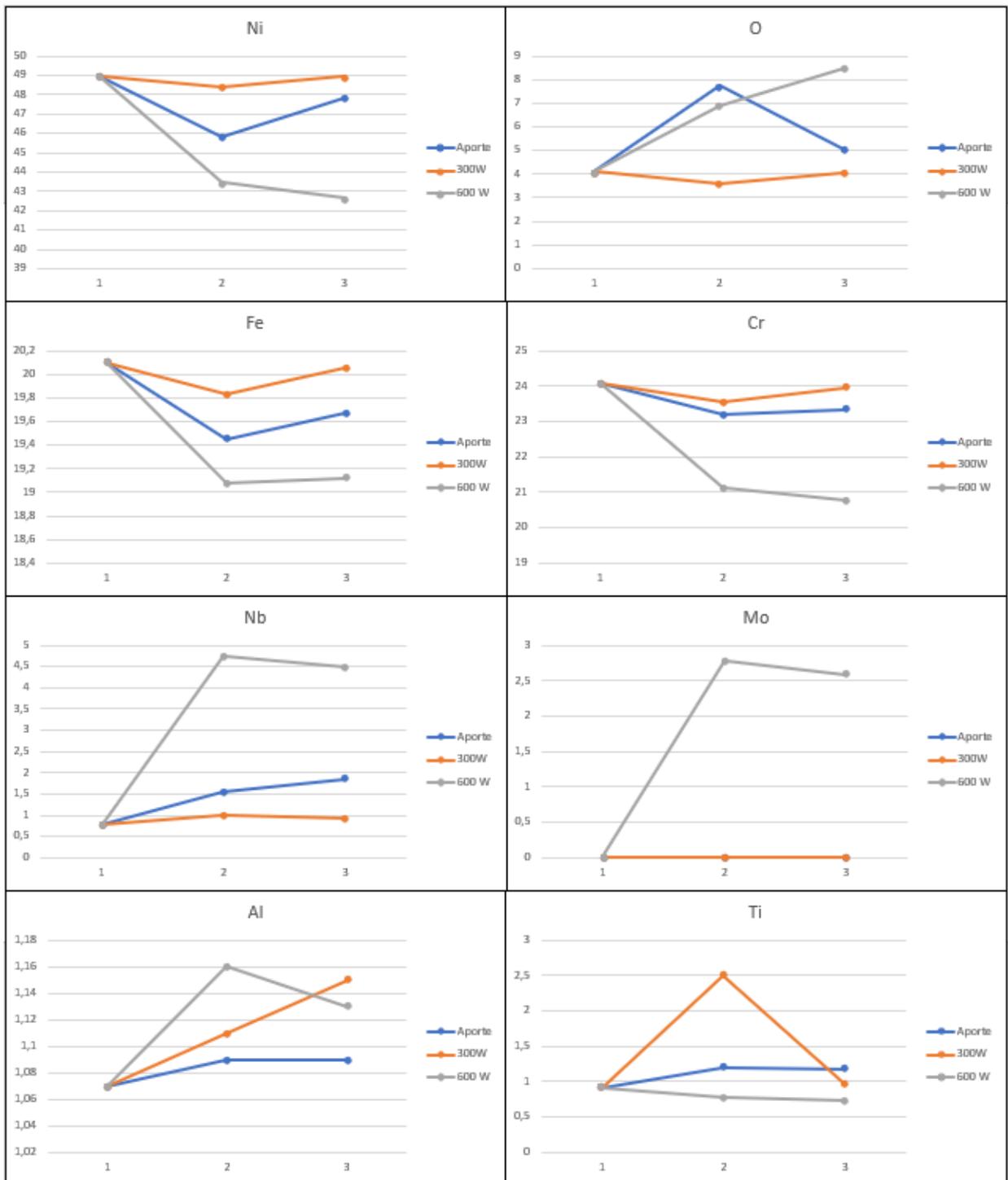


Figura 41: Validación de la metodología - composiciones

3 ASPECTOS ECONÓMICOS

3.1 HORAS INTERNAS

El cómputo de horas del estudiante, reflejado en el presupuesto como ingeniero industrial, se calcula en función del número de créditos asociados al Trabajo de Fin de Máster, sumando 25 horas de trabajo por crédito. El TFM supone 24 créditos del máster, por lo que se asumirán 600 horas de trabajo total, incluyendo entre las mismas la revisión del estado del arte, el análisis de resultados y la redacción de documentos.

Adicionalmente, se consideran 100 horas de trabajo de ingeniero técnico superior, reflejando en esta categoría el trabajo de otros integrantes del Grupo de Fabricación de Alto Rendimiento que han colaborado de alguna manera en el proyecto. Por último, se contabilizan otras 50 horas de trabajo por parte del director del TFM, como responsable del proyecto.

3.2 GASTOS

Todo el polvo empleado en las pruebas es reciclado, por lo que en el presupuesto no se contabiliza el Inconel 718. Sin embargo, se deben considerar tanto los sustratos de F1045, como las botellas de argón utilizadas.

3.3 AMORTIZACIONES

En las amortizaciones se considera también el coste de utilización de la máquina y de los fungibles o materiales utilizados en cada una. A continuación, se presenta una lista de las entradas del presupuesto en este apartado y los costes englobados en cada una:

- Centro DED: en la amortización de esta máquina no se consideran polvo, sustratos ni gas, que ya se han contabilizado en el apartado de gastos. Sí se tienen en cuenta, por otro lado, el consumo eléctrico y la amortización de la propia máquina, así como los de la refrigeradora y el alimentador de polvo.
- Rectificadora: el coste asociado engloba la amortización y el consumo de la máquina, junto con el desgaste de la muela y el consumo de taladrina.
- Sierra metalográfica: de manera similar a la rectificadora, para la sierra metalográfica se computa el desgaste del disco de corte y la taladrina utilizada.
- Equipos de metalografía: este elemento del presupuesto engloba el coste horario por la utilización de los diferentes equipos utilizados durante el análisis metalográfico, como la encapsuladora, la pulidora, el microscopio óptico o el durómetro. Además, también se incluyen aquí los consumos de agua de las diferentes máquinas, la resina utilizada en la encapsuladora, los paños y suspensiones de diamante de la pulidora y los ácidos para el ataque metalográfico.
- SEM: además del uso del propio microscopio, se han incluido los costes de preparación de las probetas.
- Otros equipos del taller: en este apartado se contabilizan los costes asociados al uso de la torre de tamices y la limpiadora de ultrasonidos, además de los costes de cualquier herramienta o material empleado no contabilizado en otros apartados, como EPIs, botes para almacenaje de polvo, equipos informáticos, llaves Allen y similares

3.4 PRESUPUESTO

En base a esto, se plantea el presupuesto general del proyecto de la siguiente forma:

Tabla 14: Presupuesto

Partida	Cantidad	Unidades	Precio unitario	Precio total
Horas internas				25.000,00 €
Ingeniero Sénior	50	h	60,00 €	3.000,00 €
Ingeniero Técnico superior	100	h	40,00 €	4.000,00 €
Ingeniero Industrial	600	h	30,00 €	18.000,00 €
Gastos				225,40 €
Botella de argón 2X de 10.5 m ³	2	Ud.	112,00 €	224,00 €
Placa de Acero F1045	2	Kg	0,70 €	1,40 €
Amortizaciones				1.998,00 €
Centro DED	25	h	9,00 €	225,00 €
Rectificadora	4	h	5,00 €	20,00 €
Sierra metalográfica	2	h	4,00 €	8,00 €
Equipos de metalografía	25	h	5,00 €	125,00 €
SEM	15	h	100,00 €	1.500,00 €
Otros equipos del taller	40	h	3,00 €	120,00 €
			Subtotal 1	27.223,40 €
			Costes indirectos (10%)	2.722,34 €
			Subtotal 2	29.945,74 €
			IVA (21%)	6.288,61 €
			TOTAL	36.234,35 €

Así, el presupuesto total del proyecto asciende a treinta y seis mil doscientos treinta y cuatro euros con treinta y cinco céntimos.

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, no se puede concluir que el Inconel sea reciclable ni tampoco que no, pero sí podemos extraer las siguientes conclusiones:

- El laseado no representa adecuadamente la realidad de una fabricación de LMD, aunque aumentando la potencia a 600W los resultados son más realistas.
- El tamizado únicamente con los límites del rango es suficiente para lograr una fluidez adecuada en la boquilla, pero solo garantiza la eliminación de los óxidos y partículas soldadas más grandes, y no garantiza buenos resultados en la fabricación.
- Para medir la composición del polvo se requiere de muestras más grandes o de la recogida de varias muestras diferentes.
- Pese a los resultados poco concluyentes obtenidos, se han observado cambios notables en las dimensiones de las probetas a partir del tercer ciclo, al igual que sucedía en el caso de estudio 2 del apartado de "sostenibilidad en LMD" del estado el arte.[15]

4.2 TRABAJOS FUTUROS

Como trabajo futuro se podría plantear la repetición de los ensayos con algunas modificaciones que permitan obtener resultados más concluyentes:

- Sustituir el laseado por una fabricación real u otro método de generación de polvo comprobando previamente su representatividad.
- Aumentar el tamaño o el número de las muestras analizadas en el SEM, o hacer al menos un estudio de repetitividad de mediciones que permita acotar la incertidumbre derivada del muestreo.
- Utilizar polvo nuevo de calidad superior para observar con mayor detalle su deterioro.

Además, también sería interesante comprobar la influencia de la separación magnética o la compensación de la distribución de diámetros de partícula en los resultados, y realizar estudios similares con otros parámetros y en diferentes materiales.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Ukar, «Apuntes del máster de Maquina Herramienta, 2º curso, Fabricación avanzada: fabricación aditiva y procesos térmicos, Tema 1: Introducción al láser en la industria, curso 2022-2023». EHU.
- [2] R. Poprawe, Ed., *Tailored Light 2: Laser Application Technology*. en RWTHedition. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-01237-2.
- [3] A. Lamikiz, E. Ukar, y I. Tabernerros, «40 años de historia del láser en la industria». Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.izaro.com/40-anos-de-historia/c-1297241898/>
- [4] A. Lamikiz, «El láser: una herramienta con muchas aplicaciones», *IMHE*, 2006.
- [5] «Apuntes del curso asociado al proyecto Additool, Modulo 6, Tecnologías de fabricación aditiva, Tema 1 Selección de la tecnología.» EHU, junio de 2022.
- [6] I. T. Campos, A. C. Ochoa, y E. U. Arrien, «Laser cladding en 5 ejes continuos para la fabricación de piezas de alto valor añadido».
- [7] E. Toyserkani, A. Khajepour, y S. F. Corbin, *Laser Cladding*. Boca Raton: CRC Press, 2004. doi: 10.1201/9781420039177.
- [8] Megamex, «Inconel aleación 718, UNS N07718», Mega Mex. Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://megamex.com/es/inconel-aleacion-718/>
- [9] A. Gámez, «Interacción entre la microestructura inicial y la precipitación en la superaleación Inconel 718», jun. 2014, Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/23073>
- [10] L. N. López de Lacalle, «Apuntes del máster de Maquina Herramienta, 1º curso, Mecanizado de alto rendimiento, Tema 5: Superaleaciones (Ni-Co), curso 2022-2023». EHU, 2019.
- [11] A. Thomas, «Estudio del comportamiento en caliente del Inconel 718», jun. 2005, Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/2774>
- [12] V. Seyda, D. Herzog, y C. Emmelmann, «Relationship between powder characteristics and part properties in laser beam melting of Ti-6Al-4V, and implications on quality», *J. Laser Appl.*, vol. 29, n.º 2, p. 022311, jun. 2017, doi: 10.2351/1.4983240.
- [13] A. Popovich, V. Sufiiarov, A. Popovich, y V. Sufiiarov, «Metal Powder Additive Manufacturing», en *New Trends in 3D Printing*, IntechOpen, 2016. doi: 10.5772/63337.
- [14] H. Zhang, J. Li, y Y. Li, «Effect of Powder Recycling on the Organization and Mechanical Properties of GH4169 Alloy by Laser Metal Deposition», *Coatings*, vol. 13, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2023, doi: 10.3390/coatings13030659.
- [15] M. Renderos, A. Torregaray, M. E. Gutierrez-Orrantia, A. Lamikiz, N. Saintier, y F. Girot, «Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material», *Mater. Charact.*, vol. 134, pp. 103-113, dic. 2017, doi: 10.1016/j.matchar.2017.09.029.
- [16] D. Powell, A. E. W. Rennie, L. Geekie, y N. Burns, «Understanding powder degradation in metal additive manufacturing to allow the upcycling of recycled powders», *J. Clean. Prod.*, vol. 268, p. 122077, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122077.