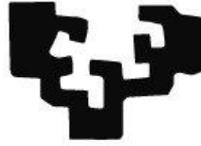


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

**Fabricación y reparación de componentes
aeronáuticos mediante DED-LB con inyección de
polvo: influencia y optimización del uso de gas
auxiliar para el aporte de materiales altamente
reactivos**

Presentada por
José Exequiel Ruiz Salas

2024

Tesis Doctoral presentada por
José Exequiel Ruiz Salas

en el
Departamento de Ingeniería Mecánica

Para la obtención del grado de Doctor por la
**Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea**

Dirigida por
**Dr. Aitzol Lamikiz Mentxaka
Dr. Eneko Ukar Arrien**

2024

Contenido

Índice de figuras	9
Índice de tablas	13
Glosario de términos y abreviaturas	15
CAPÍTULO I. Introducción.	19
I.1. Introducción	19
I.2. Objetivos	21
I.3. Organización de la memoria	21
CAPÍTULO II. Estado del Arte: Fabricación aditiva en la industria aeronáutica.	25
II.1. La fabricación aditiva.....	25
II.1.1. Fusión de lecho de polvo (PBF)	26
II.1.2. Deposición de energía focalizada (DED).....	28
II.1.3. Sector Automotriz	29
II.1.4. Sector de Matricería y Troquelaría	30
II.1.5. Sector aeronáutico	31
II.2. El proceso DED-LB	35
II.3. Descripción general de los equipos láser	37
II.4. Caracterización de los equipos láser	43
II.5. Gas empleado en el proceso de DED-LB	49
II.6. Descripción general de sistemas de alimentación de polvo	51
II.7. Polvos metálicos.....	55
II.8. Descripción general de boquillas en procesos DED-LB	57
II.9. Parámetros fundamentales del proceso DED-LB	60
II.9.1. Relación de aspecto y dilución	61
II.9.2. Potencia por unidad de área	62
II.9.3. Densidad de energía.....	62
II.9.4. Caudal másico y concentración de polvo	63
II.9.5. Combinatoria de parámetros	63

II.10. Aplicación del proceso DED-LB en la industria aeronáutica en la actualidad	65
II.11. Materiales altamente reactivos en la industria aeronáutica	68
II.12. Uso de gases inertes en los procesos de DED-LB con inyección de polvo	71
II.13. Digitalización 3D de componentes y detección automática de defectos	73
II.14. Estrategias CAM para fabricación o reparación mediante DED-LB.....	76
CAPÍTULO III. Equipamiento de laboratorio.....	81
CAPÍTULO IV. Desarrollo de una solución para el aporte de materiales de alta reactividad en el proceso de DED-LB.....	87
IV.1. Diseño y requisitos del proceso	87
IV.2. Alternativas estudiadas.....	88
IV.3. Modelo CFD para las simulaciones	90
IV.4. Resultados de las simulaciones CFD	92
IV.5. Fabricación y validación	94
IV.5.1. Concentración de polvo	94
IV.5.2. Concentración de oxígeno	97
IV.6. Discusión de resultados y conclusiones.....	99
IV.7. Ensayos de resistencia a la corrosión para piezas fabricadas en Ti6Al4V.....	100
IV.7.1. Metodología y procedimiento experimental.....	101
IV.7.2. Resultados y discusión	103
CAPÍTULO V. Optimización del consumo de gas en el proceso de DED-LB con materiales altamente reactivos.	107
V.1. Metodología.....	107
V.2. Montaje experimental para la validación del cabezal de aporte asimétrico.....	108
V.3. Descripción del modelo numérico	110
V.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	112
V.4.1. Influencia de una atmósfera protectora no simétrica en la concentración de oxígeno (S1)	112
V.4.2. Influencia de una atmósfera protectora no simétrica en la concentración de polvo (S2)	116

V.4.3. Influencia de la velocidad de avance de la máquina en la eficiencia del proceso (S3)	118
V.4.4. Influencia de la velocidad de avance en la concentración de oxígeno (S4)	120
V.5. Conclusiones	123
CAPÍTULO VI. Análisis de la influencia del helio en los procesos de DED-LB con aleaciones de base Ni y base Ti.	127
VI.1. Descripción de la metodología empleada	127
VI.2. Medición de la temperatura del baño de fusión y tiempo de enfriamiento	127
VI.3. Experimentos de deposición de metales por láser	128
VI.4. Ensayos realizados con Inconel 718	130
VI.5. Ensayos realizados con Ti6Al4V	134
VI.6. Conclusiones	137
CAPÍTULO VII. Proceso de DED-LB con inyección de polvo para la fabricación de piezas aeronáuticas.	141
VII.1. Caracterización del material para el proceso de aporte mediante DED-LB	141
VII.2. Fabricación de un componente tipo Blisk mediante DED-LB	141
VII.3. Fabricación de un componente tipo <i>bracket</i> mediante DED-LB y Ti6Al4V	145
VII.4. Conclusiones	147
CAPÍTULO VIII. Aportaciones y Líneas Futuras.	151
VIII.1. Aportaciones	151
VIII.2. Líneas Futuras	152
BIBLIOGRAFÍA	155

Índice de figuras

Figura I.1. Beneficios de los productos y servicios de la fabricación aditiva a nivel mundial [Wohlers, 2023]	19
Figura II.1. (a) Primera etapa del proceso, donde se deposita el polvo sobre la capa anterior. (b) Segunda etapa del proceso, cuando el haz láser barre la superficie fundiendo selectivamente parte de la capa de polvo.	27
Figura II.2. Esquema de proceso de polvo predepositado con haz de electrones.....	28
Figura II.3. Esquema de proceso de aporte por deposición de energía focalizada, basado en fuente láser.....	29
Figura II.4. Esquema de sistemas que intervienen en el proceso aditivo por Deposición de Energía Directa basado en fuente láser.....	36
Figura II.5. Esquema del resonador y la generación láser de estado sólido.....	37
Figura II.6. Esquema del proceso de generación de un láser de disco de estado sólido.....	40
Figura II.7. Esquema del proceso de generación de un láser de fibra óptica.....	40
Figura II.8. Esquema del proceso de generación de un láser de diodo.	41
Figura II.9. Esquema del proceso de generación de un láser de CO ₂	42
Figura II.10. Comparativa de diferentes tipos de láser y las tecnologías en las que se emplean. La tecnología de FA mediante DED-LB viene destacada en la zona amarilla.....	42
Figura II.11. Modulación de pulso y principales características.	44
Figura II.12. Características principales de un láser en régimen pulsado.	44
Figura II.13. Características de una onda electromagnética en el vacío.....	45
Figura II.14. Clasificación de las ondas electromagnéticas.	46
Figura II.15. Reflectancia de diferentes materiales según la longitud de onda incidente.....	46
Figura II.16. Modos transversales.....	47
Figura II.17. Distribución gaussiana, top-hat, y ad-hoc.	47
Figura II.18. Distribución gaussiana y medidas características.....	47
Figura II.19. Perfil de propagación del haz láser.....	48
Figura II.20. Esquema del uso de un flujo de gas tipo crossjet.....	49
Figura II.21. (a) Esquema de boquilla coaxial continua y flujos de gases y polvo. (b) Detalle de esquema de salida de boquilla coaxial continua con gas de formación.....	50
Figura II.22. (a) Esquema general de un sistema de alimentación por gravedad con dosificador. (b) Ejemplo de dosificador de disco, típico en alimentadores por gravedad.	52
Figura II.23. Esquema de alimentador mecánico por tornillo sin fin.	52

Figura II.24. Esquema de alimentador de lecho fluidizado de polvo.....	53
Figura II.25. Esquema de alimentador de polvo por vibración.....	54
Figura II.26. Fotografía de la salida de polvo de dos boquillas coaxiales. (a) Discreta. (b) Continua..	57
Figura II.27. (a) Esquema en operación de una boquilla discreta lateral. (b) Esquema de operación de una boquilla coaxial discreta.....	58
Figura II.28. Esquema en operación de una boquilla coaxial continua.....	59
Figura II.29. Sección transversal de un cordón de proceso DED-LB.....	61
Figura II.30. Máquina de medición por coordenadas, Mitutoyo Crystal Apex V.	74
Figura II.31. Sistemas ópticos. Leica Absolute Tracker AT500 (izquierda) y ATOS Triple Scan (derecha).	75
Figura II.32. Sistema de digitalización 3D portátil.	75
Figura II.33. Desarrollo de API para CAM de DED-LB [18].....	77
Figura III.1. Esquema del cabezal de aporte de DED-LB y el pirómetro para medir temperatura de manera coaxial.	82
Figura IV.1. Esquema de boquilla coaxial continua con módulo de gas auxiliar.	88
Figura IV.2. Diseño CAD del módulo de gas auxiliar unido a boquilla de DED-LB EHU-COAX2015. ...	89
Figura IV.3. Esquema de la sección de la salida de una boquilla de DED-LB con el módulo de gas auxiliar.	89
Figura IV.4. (a) Geometría del fluido que recorre el interior de la boquilla y el módulo de gas auxiliar. (b) Mallado de la geometría importada para el modelo de CFD.	91
Figura IV.5. (a) Resultados de concentración de polvo en el modelo CFD. (b) Resultados de fracción de volumen de gas argón en el modelo CFD	93
Figura IV.6. Proceso de discretización de la concentración de polvo.	95
Figura IV.7. Concentración de polvo a diferentes caudales de gas auxiliar.....	96
Figura IV.8. Comparación de resultados experimentales y simulados de concentración de polvo. ..	97
Figura IV.9. Instalación del medidor de oxígeno	97
Figura IV.10. Concentraciones de oxígeno de diferentes caudales de gas auxiliar, a 0 mm del sustrato.	98
Figura IV.11. Concentraciones de oxígeno de diferentes caudales de gas auxiliar, a 5 mm del sustrato.	98
Figura IV.12. Comparativa de resultados simulados y experimentales de concentración de oxígeno.	99
Figura IV.13. Intensidad de turbulencia simulada en el total del fluido (boquilla + módulo de gas de auxiliar).	100
Figura IV.14. Estrategia de fabricación para las probetas de Ti6Al4V.....	102

Figura IV.15. Probeta de fabricación aditiva (derecha), y probeta mecanizada posteriormente (izquierda).....	102
Figura IV.16. Ejemplo de curva Tafel	102
Figura IV.17. (a) Potencial de circuito abierto para el material base. (b) Potencial de circuito abierto en pieza de fabricación aditiva.....	103
Figura IV.18. (a) Curva Tafel para el material base. (b) Curva Tafel para el material fabricado por aditivo. (c) Curva Tafel del material fabricado con aditivo y mayor resistencia a la corrosión.....	104
Figura V.1 Metodología para el análisis de los flujos de gas en una boquilla asimétricos de DED-LB.	108
Figura V.2. Esquema de las diferentes configuraciones de las boquillas: (a) sin gas auxiliar, (b) con gas auxiliar simétrica, y (c) con gas auxiliar asimétrica.....	109
Figura V.3. Condiciones de contorno del modelo.	111
Figura V.4. Esquema de los ensayos experimentales del primer estudio (S1).....	112
Figura V.5. Mapa de concentración de oxígeno por debajo de las 50 ppm, para los casos de estudio.	114
Figura V.6. Concentración de oxígeno en ppm a lo largo del eje OX para las configuraciones analizadas (S1.0, S1.1, y S1.2).....	115
Figura V.7. (a) Vista lateral de la atmósfera asimétrica generada (S1.2). (b) Detalle de la salida de gas de la boquilla y sus vectores de velocidad. (c) Vista en 3D de la atmósfera de protección asimétrica.	116
Figura V.8. Comparativa entre las medidas discretas de concentración de polvo y las obtenidas mediante el modelo de CFD.....	117
Figura V.9. (a) Fotografía obtenida experimentalmente de la salida de polvo en la boquilla. (b) Resultado del modelo de CFD. (c) Concentración de polvo a lo largo del eje OZ.....	118
Figura V.10. Haz láser representado por línea vertical de color rojo, junto con atmósfera protectora asimétrica y distribución de polvo a diferentes velocidades. (a) 500 mm·min ⁻¹ . (b) 5000 mm·min ⁻¹	119
Figura V.11. Variación del rendimiento másico acorde al aumento de la velocidad de avance.	120
Figura V.12. Evolución de la temperatura de un punto fijo de un cordón de aporte, con respecto al centro del haz láser. (700 W de potencia láser, 800 mm·min ⁻¹ de velocidad de avance, y 5 g·min ⁻¹ de flujo másico de polvo)	121
Figura V.13. (a) Comparación entre el tiempo que un material caliente necesita ser protegido y el tiempo de protección que ofrece la boquilla según su configuración. (b) Longitud del cordón protegida para una velocidad de avance de 2000 mm·min ⁻¹ . (c) Resultados de la simulación de S4.2 para 2000 mm·min ⁻¹	122

Figura VI.1. Medidas de temperatura del encendido y apagado del láser con las tres mezclas de gases.	128
Figura VI.2. Secciones transversales de los cordones de aporte a 400 W, para Inconel 718.....	130
Figura VI.3. Secciones transversales de los cordones de aporte a 600 W, para Inconel 718.....	131
Figura VI.4. Secciones transversales de los cordones de aporte a 800 W, para Inconel 718.....	131
Figura VI.5. Medidas de las temperaturas para cada mezcla de gas y potencia ensayadas.	132
Figura VI.6. Medidas de la temperatura para cada mezcla de gases y potencia de láser de 500 W	135
Figura VI.7. Medidas de la temperatura para cada mezcla de gases y potencia de láser de 700 W	136
Figura VI.8. Medidas de la temperatura para cada mezcla de gases y potencia de láser de 900 W	137
Figura VII.1. Corte metalográfico de corte transversal de un cordón de Hastelloy X.....	143
Figura VII.2. (a) Defecto de acumulación de material. (b) Ensayos de estrategias de aporte helicoidales. (c) Aporte de todos los álabes del blisk. (d) Mecanizado de los álabes.	144
Figura VII.3. CAD de la propuesta de componente tipo bracket. (a) CAD de la pieza final. (b) CAD de la pieza objetivo con material extra para el amarre en máquina.	146
Figura VII.4. Diferentes secuencias de fabricación.	147

Índice de tablas

Tabla II.1. Diferentes tipos de láser y su longitud de onda característica, clasificados por su medio activo.....	39
Tabla II.2. Componentes reparados por DED-LB y lista de algunos materiales empleados [Kaser]...66	
Tabla III.1. Composición química (% en peso) del polvo de Inconel 718.....	83
Tabla III.2. Distribución del tamaño de las partículas (DTP) de polvo de la aleación Inconel 718.....	83
Tabla III.3. Composición química (% en peso) del polvo de titanio Ti6Al4V.....	83
Tabla III.4. Distribución del tamaño de las partículas (DTP) de polvo de la aleación Ti6Al4V.....	83
Tabla III.5. Composición química (% en peso) del Inconel 718, como material base en forma de palanquilla.....	83
Tabla III.6. Composición química (% en peso) del Ti6Al4V, como material base en forma de palanquilla.....	83
Tabla IV.1. Tabla de distancias entre caras de diseño y flujos de gas correspondientes.....	90
Tabla IV.2. Condiciones de contorno para las simulaciones del modelo CFD.....	92
Tabla IV.3. Resumen de concentraciones de polvo en función del flujo de gas auxiliar.....	96
Tabla V.1. Resumen de los parámetros de entrada en las condiciones de contorno de los diferentes modelos CFD.....	111
Tabla V.2. Valores medios de las medidas experimentales de la concentración de oxígeno en ppm en puntos discretos. La medida superior se corresponde con S1.0, la intermedia en negrita con S1.1, y la inferior en <i>cursiva</i> con S1.2.....	113
Tabla V.3. Velocidad máxima de avance para evitar la oxidación y su correspondiente incremento en productividad comparado con el rendimiento de la configuración sin gas auxiliar.....	123
Tabla VI.1. Parámetros de referencia para el aporte de Inconel 718 y Ti6Al4V.....	129
Tabla VI.2. Resumen de los parámetros para los ensayos de Inconel 718.....	129
Tabla VI.3. Resumen de parámetros para los ensayos de Ti6Al4V y diferentes caudales de gas auxiliar.....	129
Tabla VI.4. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 400 W. Entre paréntesis se encuentra la desviación estándar de la medida.....	130
Tabla VI.5. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 600 W. Entre paréntesis se encuentra la desviación estándar de la medida.....	131

Tabla VI.6. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 600 W. Entre paréntesis se encuentra la desviación estándar de la medida.....	132
Tabla VI.7. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 500 W.	134
Tabla VI.8. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 700 W.	135
Tabla VI.9. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 900 W.	136
Tabla VII.1. Composición química del Hastelloy X (% en peso)	142
Tabla VII.2. Parámetros de aporte mediante DED-LB para polvo metálico de Hastelloy X.....	143
Tabla VII.3. Parámetros de entrada para el aporte de Ti6Al4V.....	145

Glosario de términos y abreviaturas

Capa		Superficie creada a partir de material distribuido por medio de un proceso de fabricación aditiva.
Cordón		Generación de una sola línea de aporte de material por fabricación aditiva.
Crossjet		
Deposición de energía focalizada	[DED]	Término en inglés: <i>Directed Energy Deposition</i> . Proceso de fabricación aditiva que une el material a la vez que se deposita, empleando energía térmica focalizada.
DED-LB		Proceso DED cuya fuente de energía térmica es un haz láser.
DED-EB		Proceso DED cuya fuente de energía térmica es un haz de electrones.
DED-Arc		Proceso DED cuya fuente de energía térmica es un arco eléctrico.
Extrusión de material	[MEX]	Término en inglés: <i>Material Extrusion</i> . Proceso de fabricación aditiva en el cual el material se dispensa de forma selectiva a través de una boquilla o un orificio.
Fabricación Aditiva	[FA]	Proceso que permite la fabricación de piezas a partir de modelos 3D mediante la unión de materiales depositados capa a capa. Se diferencia de los métodos de fabricación convencionales que se basan en eliminación de material y/o conformado.
Fusión de lecho de polvo	[PBF]	Término en inglés: <i>Powder Bed Fusion</i> . Proceso de fabricación aditiva que se basa en la fusión selectiva, mediante energía térmica, de zonas concretas de un lecho de polvo predepositado.
Gas de arrastre, transporte, o portador		Flujo de gas empleado para transportar las partículas de polvo (material aditivo) desde el alimentador hasta la zona de fusión.
Gas de protección		Flujo de gas que genera una zona de protección en el proceso aditivo para evitar reacciones entre el material aportado y la atmósfera.
Gas de protección, extra o auxiliar		Flujo extra de gas que puede tener diferentes objetivos, como pueden ser: aumentar la protección o la concentración de polvo.
PBF-LB		Proceso PBF cuya fuente de energía térmica es un haz láser.
PBF-EB		Proceso PBF cuya fuente de energía térmica es un haz de electrones.

PBF-IrL		Proceso PBF cuya fuente de energía térmica es luz infrarroja.
Impresión 3D		Fabricación de piezas mediante deposición de materiales utilizando un cabezal de impresión, una boquilla u otra tecnología de impresión.
Plano focal del láser		Es el plano donde el conjunto de lentes del cabezal enfocan el haz láser y por lo tanto este posee su menor área.
Plano focal de la boquilla, cabezal o polvo		Es el plano donde la boquilla o cabezal de aporte enfoca el flujo de polvo y gas y por lo tanto tiene la máxima concentración de polvo y menor área. No tiene por qué coincidir con el plano focal del láser.
Proyección de aglutinante	[BJT]	Término en inglés: <i>Binder Jetting</i> . Proceso de fabricación aditiva que se basa en la unión de materiales en polvo mediante un agente aglutinante.
Proyección de material	[MJT]	Término en inglés: <i>Material Jetting</i> . Proceso de fabricación aditiva en el cual se depositan de forma selectiva gotas de materia prima.
Soporte		Estructura que, no perteneciendo a la geometría de la pieza a fabricar, se emplea para sostener y fijar dicha pieza durante un proceso de fabricación aditiva.
Velocidad de avance		Velocidad que posee el cabezal de aporte o la herramienta en general.

CAPÍTULO I. Introducción

CAPÍTULO I. Introducción.

I.1. Introducción

El presente documento es el resumen de los estudios realizados en el ámbito de la fabricación aditiva, mediante deposición de energía focalizada basada en láser e inyección de polvo, y en su empleo con materiales aeronáuticos, en especial aquellos altamente reactivos.

La motivación de dichos estudios viene impulsada por el auge que las tecnologías de fabricación aditiva han venido mostrando en los diferentes sectores industriales, y los retos técnicos que su incorporación supone para la profesión de la ingeniería. Testigos de este auge, son los datos recogidos por el informe Wohlers de 2023 [Wohlers Report 2023] sobre los beneficios globales de los productos y servicios de la fabricación aditiva (Figura I.1). El mismo informe asegura que la industria de la fabricación aditiva sigue expandiéndose hacia aplicaciones de producto final. Esta tendencia crecerá a medida que se sigan desarrollando y adoptando normas. La fabricación aditiva está produciendo piezas cada vez más grandes y críticas en múltiples sectores industriales.

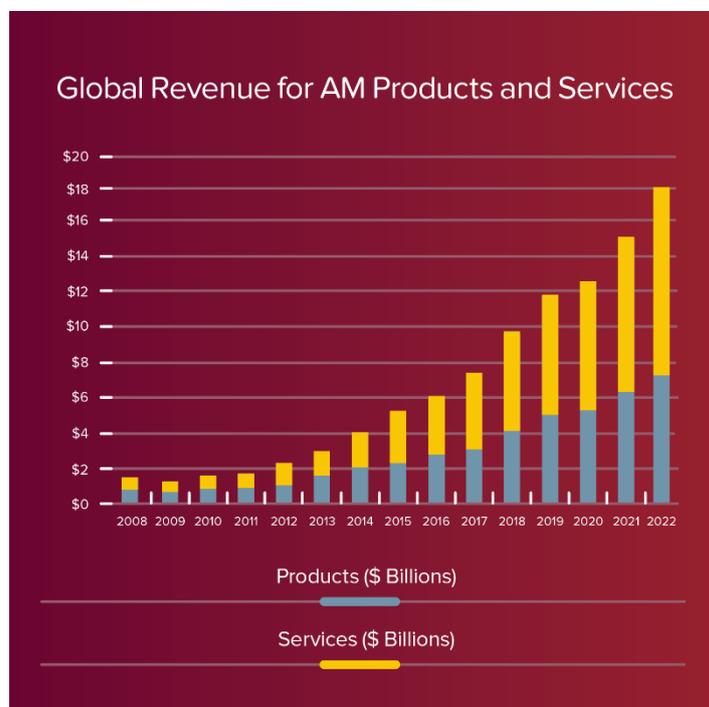


Figura I.1. Beneficios de los productos y servicios de la fabricación aditiva a nivel mundial [Wohlers, 2023]

El sector aeroespacial abarca aeronaves comerciales y militares, sistemas de lanzamiento espacial, satélites y aviación general. La reciente pandemia de COVID-19 ha tenido un impacto

negativo sustancial en los ingresos del sector aeroespacial en 2019 y 2020 [Blakey-Milner et al. 2021]. Este descenso fue causado principalmente por las restricciones en los viajes aéreos, los protocolos de distanciamiento social y otras restricciones impuestas a la industria de la aviación comercial durante la pandemia. Sin embargo, se espera que el sector aeroespacial crezca hasta alcanzar unos ingresos de 430.870 millones de dólares en el año 2025 [TBRC, 2021]. Este crecimiento se debe principalmente a la demanda a largo plazo de nuevas aeronaves comerciales, al aumento del gasto militar mundial, a la gran actividad del mercado en el sector espacial y a la importante investigación y desarrollo en curso durante la pandemia [Blakey-Milner et al. 2021].

Aprovechando la libertad de diseño que la fabricación aditiva ofrece, es posible optimizar los componentes para reducir su peso sin afectar a los requisitos mecánicos. Es posible mejorar el rendimiento, superando la fabricación estrictamente convencional, utilizando enfoques de optimización mecánica, térmica y de otro tipo para el diseño de piezas complejas que antes eran imposibles de fabricar, incorporando características internas como canales de refrigeración conformados en cámaras de combustión o álabes de turbina, por ejemplo [Snyder y Thole, 2019], [Kerstens et al. 2021].

El sector aeronáutico es uno de los principales interesados en este tipo de optimización de propiedades físicas, a cambio de una reducción de peso en los componentes. Sin embargo, también presenta desafíos técnicos derivados de los materiales utilizados en la fabricación de los distintos componentes. Estos materiales cubren un amplio abanico, que va desde las superaleaciones termorresistentes como las basadas en Ni o Co, hasta los materiales reactivos, entre los que se encuentran, principalmente, aleaciones de aluminio o titanio.

En él se pretende desarrollar una solución viable que dote al cabezal de aporte, de la capacidad de trabajar con dichos materiales sin la necesidad de una cámara de vacío o entorno cerrado de atmósfera inerte. A su vez, se propone la optimización de dicha solución, disminuyendo en la medida de lo posible el consumo de gas inerte necesario para el proceso de fabricación. Dada la existencia de diferentes gases que sirven para inertizar el proceso, se propone también un estudio para analizar la influencia del uso de diferentes gases durante el proceso. Y por último se diseñan dos piezas diferentes que implementan el conocimiento generado y las mejoras desarrolladas.

I.2. Objetivos

Uno de los principales objetivos de este trabajo es desarrollar la capacidad de trabajar con materiales altamente reactivos, como el Ti6Al4V mediante el uso de la tecnología DED-LB con inyección de polvo sin un entorno de vacío o recinto cerrado con atmosfera inerte. Se marcan también objetivos de optimización de dicho proceso basándose en la reducción del gas empleado y el uso de distintas mezclas de gases inertes.

El desarrollo de estos estudios se realiza persiguiendo una serie de objetivos o hitos que se detallan a continuación:

- ✓ Estudio bibliográfico de la situación actual de la fabricación aditiva, reconociendo las dificultades dentro del sector aeronáutico para el proceso de fabricación mediante DED-LB con inyección de polvo.
- ✓ Plantear una solución viable que sustituya las cámaras de vacío y los recintos cerrados de atmosfera inerte para el procesado de materiales susceptibles de oxidaciones durante el procesamiento con láser.
- ✓ Desarrollar un modelo CFD que evalúe dicha solución y asegurarse de su fiabilidad mediante ensayos que validen los resultados matemáticos.
- ✓ Emplear dicho modelo de CFD para realizar una optimización del diseño de la solución aportada.
- ✓ Caracterizar al menos un material altamente reactivo con el objetivo de emplear la solución alcanzada en los objetivos anteriores.
- ✓ Estudiar la influencia de distintas mezclas de gases inertes en el proceso de fabricación mediante DED-LB.
- ✓ Emplear la caracterización del material y los conocimientos desarrollados para la fabricación de unas piezas de muestra, a modo de validación de las soluciones aportadas.

I.3. Organización de la memoria

Capítulo I: se trata de una breve introducción al contexto, y los objetivos del presente documento. Se explican las motivaciones y se expresan de manera simplificada los objetivos que se perseguirán a lo largo de la presente memoria.

Capítulo II: en este capítulo se realiza una exposición del estado del arte de los procesos de fabricación aditiva, atendiendo a los fundamentos de los mismos y sus características principales. Se hace especial mención a los de inyección de polvo metálico y deposición de

energía focalizada. Se ofrece contexto de este tipo de tecnología en el ámbito de la aeronáutica y las dificultades que enfrenta en la actualidad.

Capítulo III: aquí se detalla el equipo de laboratorio común al resto de los capítulos. Se presenta la célula de procesamiento láser, el cabezal de aporte, los diferentes sensores y los materiales a utilizar.

Capítulo IV: en el presente capítulo se presenta el diseño y la fabricación de un módulo que se acople a una boquilla de aporte para DED-LB. La finalidad de este módulo es dotar a la boquilla de la posibilidad de procesar estos materiales altamente reactivos proporcionando un flujo de gas inerte auxiliar. Se presenta un modelo CFD y su validación experimental, que será empleado en subsiguientes capítulos. Por último, se documentan los ensayos de resistencia a la corrosión realizados a las probetas fabricadas con el módulo de gas auxiliar.

Capítulo V: en este capítulo se propone generar una atmósfera protectora con un diseño optimizado de la boquilla del capítulo anterior. Se trata de un diseño de boquilla asimétrica que permita introducir argón sólo donde es necesario y que reduzca el consumo de gas. Por último, se analiza el impacto de la atmósfera protectora asimétrica para diferentes velocidades de avance, analizando la eficiencia másica del proceso y la resistencia a la posible oxidación del material.

Capítulo VI: el objetivo del presente capítulo es evaluar el efecto de la mezcla de argón y helio en el proceso DED-LB mediante el análisis de cordones individuales de las aleaciones de base Ni, Inconel 718, y titanio, Ti6Al4V.

Capítulo VII: este capítulo ofrece una metodología para la caracterización de los materiales trabajados a lo largo de la memoria. Deja constancia en este documento de la fabricación de dos piezas con finalidad aeronáutica, que se realizan en materiales presentes en dicho sector y que recopilan el conocimiento generado a lo largo de toda la investigación.

Capítulo VIII: Aquí se dejan reflejadas las líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO II. Estado del Arte: Fabricación aditiva en la industria
aeronáutica

CAPÍTULO II. Estado del Arte: Fabricación aditiva en la industria aeronáutica.

II.1. La fabricación aditiva

La Organización Internacional de Normalización (*International Organization for Standardization* – ISO) define la fabricación aditiva como un proceso a través del cual se fabrican piezas, a partir de modelos 3D, mediante la unión de materiales depositados capa a capa; y se diferencia de los métodos convencionales de fabricación que fundamentalmente se basan en eliminación de material y/o conformado. Según esta misma organización, existen 7 categorías que engloban los procesos de fabricación aditiva en la actualidad [ISO/ASTM 52900:2021]:

- **Proyección de aglutinante (BJT – binder jetting):** en este proceso se emplea un líquido aglutinante que se deposita selectivamente sobre una capa de polvo de material predepositado.
- **Deposición de energía focalizada (DED – directed energy deposition):** Este proceso emplea energía térmica focalizada para producir la fusión de material a medida que se deposita sobre un sustrato. Dependiendo de la fuente de energía empleada, el proceso se denomina de manera diferente. Para el caso de un haz láser, el proceso se definiría como DED-LB, para un haz de electrones, como DED-EB, y para el caso en que se empleen arcos de plasma, DED-Arc.
- **Extrusión de material (MEX – material extrusion):** Es un proceso en el cual se dispensa material a través de una boquilla u orificio.
- **Proyección de material (MJT – material jetting):** consiste en la deposición selectiva de gotas de material.
- **Fusión de lecho de polvo (PBF – powder bed fusion):** proceso que emplea una fuente de energía térmica para fundir selectivamente zonas de una capa de polvo predepositado. Las siglas de este proceso llevan un sufijo dependiendo del origen de la fuente de energía, PBF-LB para una fuente láser, PBF-EB para una fuente de haz de electrones y PBF-IrL para una fuente de luz infrarroja.
- **Laminado de hojas (SHL – sheet lamination):** proceso por el cual se unen láminas de material hasta formar una geometría.

- **Fotopolimerización en tanque o cuba (VPP – vat photopolymerization):** el proceso utiliza un fotopolímero líquido, contenido en una cuba, que se cura selectivamente empleando luz para activar su polimerización.

De los procesos mencionados, la fusión de lecho de polvo y la deposición de energía focalizada han despertado gran interés industrial en los últimos años. Ambos procesos se emplean principalmente para materiales metálicos, y aportan gran versatilidad en el diseño de piezas, gracias a su capacidad de generar casi cualquier geometría. Sus diferencias técnicas y limitaciones han hecho que ninguno prevalezca sobre el otro, siendo necesario escoger entre ambos para cada tipo de componente u operación. Entre las limitaciones mencionadas se encuentran, disponibilidad de materiales, precisión, calidad superficial, resolución, volumen de fabricación, y velocidad del proceso, así como también el preprocesado de la geometría.

II.1.1. Fusión de lecho de polvo (PBF)

En los procesos PBF, una fuente de energía (láser o haz de electrones) incide sobre una capa de polvo, previamente depositada, resultando en una fusión o sinterización local del material, hasta crear la geometría deseada. El proceso continúa, depositando polvo nuevamente sobre el área de trabajo y empleando dicha fuente de energía para generar la geometría correspondiente a esta nueva capa de material. Las etapas se suceden hasta generar la geometría 3D, que queda inmersa en el polvo que no ha sido afectado durante el proceso. Es un proceso, por lo tanto, de dos etapas, una en la que se deposita el polvo y otra en la que se produce la fusión local del mismo (Figura II.1. (a) y (b)).

Entre las ventajas de la tecnología PBF se encuentran, su capacidad de producir geometrías complejas y la posibilidad de crear conductos interiores. Aunque el proceso goza de una alta resolución, de unas pocas decenas de micras, su principal inconveniente es su capacidad volumétrica. Esta desventaja no sólo limita el tamaño de las piezas, sino que plantea también otro tipo de dificultades como la cantidad de polvo necesaria para una fabricación, ya que es igual al volumen que resulta del área de trabajo y la altura de la pieza. Por otra parte, el cambio de material de fabricación en una misma máquina es algo costoso, debido a las complejas tareas de limpieza, necesarias para evitar la contaminación cruzada de los materiales.

Dentro de esta categoría, uno de los procesos más extendidos es el de *Selective Laser Melting* (SLM), o PBF-LB. La fuente de energía utilizada es un láser de alta densidad de potencia que se emplea para la fusión del polvo metálico, cuya granulometría oscila entre los 10 y los 40 μm , y

el sustrato inicial suele ser una placa metálica. El proceso, se lleva a cabo en una cámara estanca y con una atmosfera inerte de argón o helio.

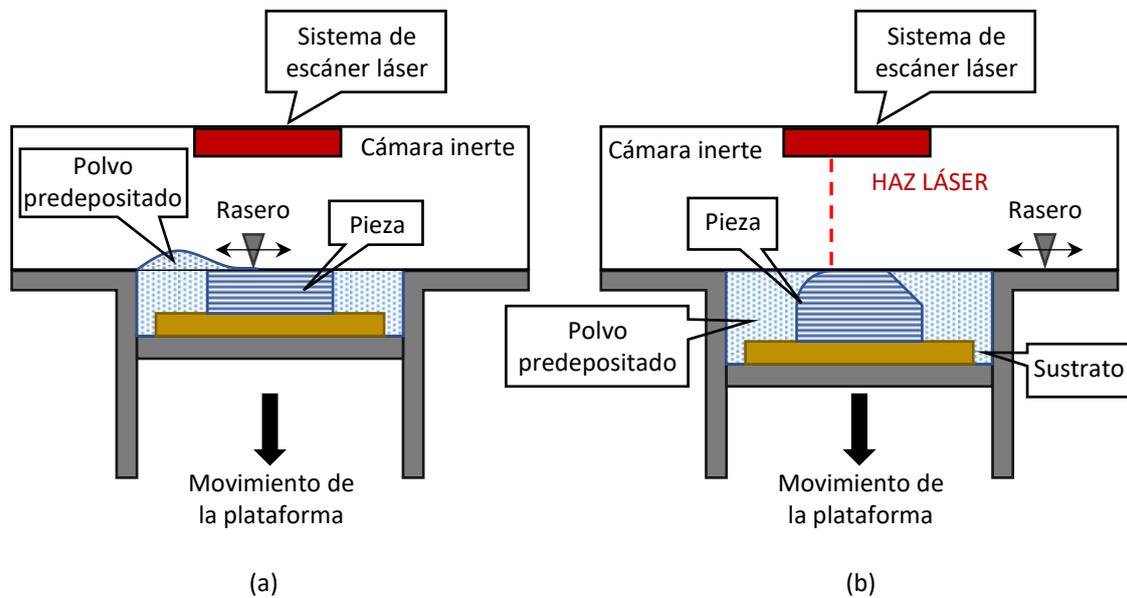


Figura II.1. (a) Primera etapa del proceso, donde se deposita el polvo sobre la capa anterior. (b) Segunda etapa del proceso, cuando el haz láser barre la superficie fundiendo selectivamente parte de la capa de polvo.

Para la generación de las distintas capas, en las que se divide la geometría, se emplean programas especializados que permiten definir la orientación de la pieza, la posición dentro de la cámara de fabricación y los parámetros del proceso.

El *Electron Beam Melting* (EBM), o fusión por haz de electrones, es un proceso similar al de SLM, y otro de los más extendidos dentro de la categoría de procesos PBF. Una de las diferencias más importantes es la fuente de energía empleada para la fusión del material. En este caso, el haz láser es reemplazado por un haz de electrones que es guiado por un campo magnético para la fusión capa a capa del metal en polvo. La cámara estanca con atmósfera de gas inerte es sustituida por una cámara de alto vacío, que evita que los electrones colisionen con otras partículas antes de alcanzar el sustrato (Figura II.2). La granulometría del polvo, empleado como material de aporte, puede ser mayor que para los procesos de SLM, dando lugar a piezas con una rugosidad de superficie también mayor, y a una posible pérdida de resolución.

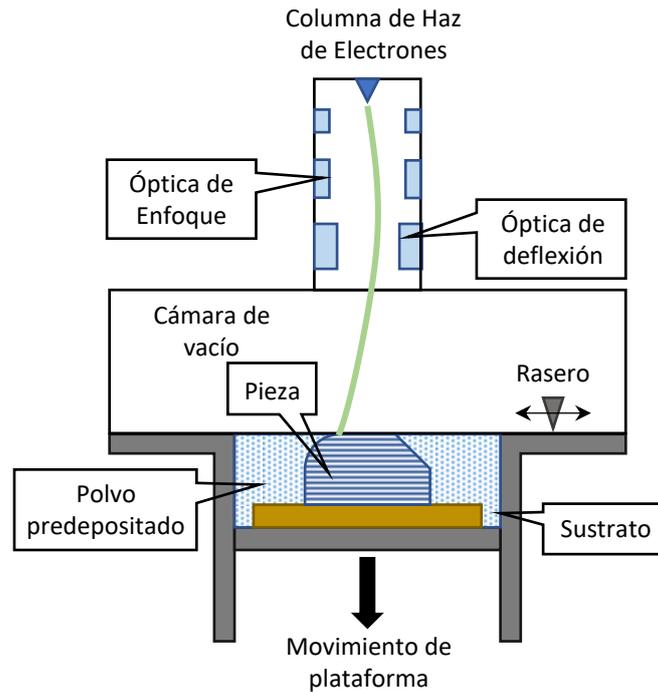


Figura II.2. Esquema de proceso de polvo predeposicionado con haz de electrones.

La temperatura de precalentamiento de la placa que sirve como sustrato inicial del proceso también cambia, y puede alcanzar aproximadamente los 700 °C para el caso del EBM, frente a los 250 °C habituales en SLM, cuando se precalienta la base de fabricación. Este cambio produce distintas curvas de enfriamiento, y por lo tanto diferentes granulometrías y propiedades mecánicas; al tiempo que limita el uso de materiales con un punto de fusión cercano a la temperatura de la placa. Sin embargo, las propiedades mecánicas resultantes suelen ser superiores, consecuencia de una estructura con menos defectos.

II.1.2. Deposición de energía focalizada (DED)

En los procesos de deposición por energía focalizada, el material se dispensa al mismo tiempo que la fuente aporta la energía para su fusión. Por lo tanto, a diferencia de los procesos PBF, los procesos DED son de una sola etapa. Esta tecnología permite trabajar con varios materiales simultáneamente y abre la posibilidad a la reparación de componentes o la generación de geometrías nuevas sobre otras ya existentes. Los procesos DED pueden mostrar también una mayor tasa de aporte de material y un mayor volumen de trabajo que los procesos PBF. Sin embargo, cuentan con algunas desventajas, como una menor resolución o la dificultad para fabricar conductos internos o aportar sobre superficies con un ángulo de inclinación muy pronunciado con respecto a la vertical.

Aunque existen diferentes tipos de tecnologías aditivas que pueden categorizarse como DED, la que más destaca es la deposición de material por láser, más conocida por sus múltiples

denominaciones en inglés, tales como *Laser Metal Deposition* (LMD), *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Laser Cladding* o *Direct Metal Deposition* (DMD). Este proceso consiste en el empleo de un haz láser, como fuente de energía térmica, para generar sobre el material base una zona localizada de fusión donde se inyecta el material de aporte, dispensado en forma de hilo o polvo (Figura II.3). Las tasas de aporte para la tecnología DED-LB varían habitualmente entre 1 y 2 kg·h⁻¹, lo que resulta unas 10 veces lo aportado en procesos SLM. Mientras que, si se requieren tasas de aporte mayores se recurre con frecuencia al aporte con arco de plasma, denominado en inglés como *Wire Arc Additive Manufacturin* (WAAM). En este proceso la fuente de energía es sustituida por un arco voltaico que típicamente es capaz de fundir hilos de varios milímetros de diámetro, llegando a tasas de aporte que rondan los 6 kg·h⁻¹.

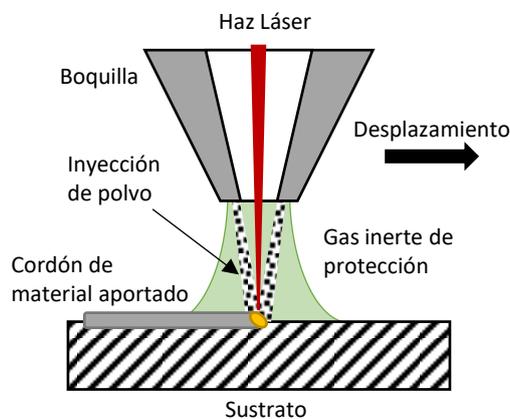


Figura II.3. Esquema de proceso de aporte por deposición de energía focalizada, basado en fuente láser.

II.1.3. Sector Automotriz

La industria automotriz introdujo las tecnologías de fabricación aditiva a principio de los años 90, centrándose en el prototipado rápido. Sin embargo, en la actualidad, se emplea también para la fabricación de utillajes, herramientas y modelos e insertos para los moldes de fundición.

El volumen de producción del sector hace imposible la incorporación de la fabricación aditiva a piezas o componentes finales. Sin embargo, existen excepciones, como el incremento en la demanda de productos personalizados o adaptados que han recapturado el interés por este proceso en el sector. De acuerdo con el informe Wohlers de 2016 [Wohlers, 2016], el sector automotriz fue el tercero en uso de la fabricación aditiva con un 13,8 % del total.

Otras tendencias que impulsan el uso de la fabricación aditiva en la industria automotriz son la incorporación de nuevos materiales o la eficiencia ecológica. La capacidad de crear

componentes multimateriales o la mejora de propiedades mediante recubrimientos, son algunas aportaciones posibles por parte de este tipo de tecnología. A su vez, la industria automotriz persigue reducir emisiones y consumo en sus productos, y esto supone en ocasiones una reducción del peso del vehículo. La fabricación aditiva permite el diseño de piezas con geometrías más complejas que cumplan con este propósito a la vez que abre la puerta no sólo a la reparación de estas, sino a la de otros componentes, permitiendo así aumentar la vida útil de los mismos.

Lamentablemente, el limitado volumen de producción, así como el tamaño máximo de las piezas, han limitado el crecimiento de aplicaciones de la fabricación aditiva en la industria automotriz.

II.1.4. Sector de Matricería y Troquelería

Al igual que sucede en la industria aeronáutica con las piezas fabricadas, la fabricación de moldes para inyección de plásticos o de troqueles para el conformado de chapa, suponen la manufactura de piezas de gran valor añadido y de series muy cortas. El diseño geométrico de los moldes busca resolver varios inconvenientes para garantizar la calidad de la pieza, además de conseguir la forma deseada durante la inyección. Entre los problemas más comunes, se encuentra la porosidad, debida al gas atrapado en el interior del material, las faltas de llenado, las desviaciones geométricas debidas a contracciones y el desgaste de los moldes o la adherencia de material a este. Como solución, se diseñan estos moldes con canales de ventilación y evacuación de gases, circuitos de refrigeración y mejoras que incluyen calidades de acabado y texturas superficiales, entre otras. Lo mismo sucede en el sector de la troquelería, donde vuelven a repetirse ciertas casuísticas, como el caso de los circuitos de refrigeración, por ejemplo, en la estampación en caliente.

Tradicionalmente, la fabricación de este tipo de piezas se ha realizado por métodos convencionales, que engloban varios tipos de mecanizado. Sin embargo, la incorporación de la fabricación aditiva ha supuesto una mayor flexibilidad en el diseño de estos componentes, superando las limitaciones ligadas al mecanizado. La creación de conductos de refrigeración con geometrías no rectilíneas es uno de los ejemplos, así como la capacidad de emplear diferentes materiales en el mismo molde o troquel. Además de todo lo mencionado, se debe mencionar la ventaja de obtener piezas más cercanas a la geometría final, con la consiguiente reducción de operaciones de desbaste y material necesario. La reparación de zonas específicas después de sufrir desgastes o errores de mecanizado permite no solo prolongar la vida útil sino minimizar los descartes, lo cual redundará en un beneficio económico y reducción de tiempos de reparación.

II.1.5. Sector aeronáutico

El sector aeronáutico, a diferencia del sector automotriz, se caracteriza por la fabricación de piezas de un alto valor añadido y producciones de series cortas. Existe una notable diferenciación entre los componentes estructurales y los destinados al motor o sistema de propulsión. Los primeros, en gran medida, suelen ser estructuras de dimensiones medias y grandes, de complejidad media a nivel geométrico y fabricadas en aleaciones ligeras o materiales compuestos. Por otro lado, dentro de los motores, los componentes resultan ser, en numerosas ocasiones, de geometrías complejas y materiales avanzados, como titanio o superaleaciones termorresistentes, que incluso presentan dificultades en los procesos convencionales, como el mecanizado. La fabricación aditiva se ha incorporado a este sector, enfocada a estos materiales especiales, aunque produciendo de momento, sólo componentes estáticos y sometidos a esfuerzos menores, dada la incertidumbre existente en la influencia que pueden tener los posibles defectos internos generados en el proceso como la porosidad o la falta de fusión en las propiedades mecánicas resultantes, sin embargo, existen diversos casos de éxito y en la actualidad se están fabricando varios componentes mediante tecnologías de fabricación aditiva. Así, por ejemplo, la compañía General Electric produce por tecnología aditiva las boquillas de combustible que se emplean en el motor turbofán LEAP 1A, actualmente en servicio en las aeronaves Airbus A320 NEO, y que han contribuido a reducir el consumo de combustible, al reducir drásticamente el número de componentes, obteniendo un menor peso y una mayor eficiencia. Esta misma empresa apunta a fabricar hasta un 35% de los componentes de sus siguientes motores ATP (*Advanced Turboprop*).

La generación de recubrimientos es otro uso de esta tecnología que ha permitido a la fabricación aditiva hallar aplicaciones en el sector aeronáutico; ofreciendo un cambio en las propiedades mecánicas o químicas; ya sea aumentando el espesor de algunos componentes o aportando distintos materiales sobre las superficies previamente existentes, para mejorar las características mecánicas y térmicas de los mismos. La multinacional GKN, dedicada a la fabricación de componentes aeronáuticos, tiene en producción y en servicio piezas fabricadas en titanio a las que añade resaltes y guías por medio de diversos procesos de DED. De modo que simplifica el proceso de producción y se ahorra material.

La reparación de componentes ha resultado ser otro nicho para la fabricación aditiva. Como se ha mencionado, muchos componentes aeronáuticos son piezas de alto valor añadido, y su reparación resulta en un gran beneficio económico y logístico, ya que prolonga la vida útil de los mismos y reduce también las necesidades de almacén para piezas de recambio. Asimismo, la

recuperación de componentes que presentan algún tipo de defecto durante el proceso de fabricación, tales como piezas de fundición a la cera perdida, está cada vez más extendida y permite un ahorro significativo.

Entre los motivos que impulsan el uso de la fabricación aditiva en el sector aeronáutico se encuentran:

- Reducción de material necesario. Empleando la tecnología aditiva para obtener componentes más próximos a la geometría final supone una disminución del material de partida necesario para cada pieza. Esto no solo resulta en una reducción de costes en materiales sino también en la disminución de residuos.
- Reducción de procesos de desbastes. Piezas más cercanas al producto final requieren menos operaciones de mecanizado, con su consecuente reducción de costes.
- Reducción de almacén. La capacidad de producir una pieza específica disminuye la necesidad de almacenar recambios para todas las situaciones.
- Recuperación de piezas con defectos.

Cumplir con las exigencias requeridas en los componentes aeronáuticos plantea una serie de retos, que la fabricación aditiva ha ido superando con el tiempo. Es necesario, principalmente, garantizar la repetitividad en la fabricación, y en este ámbito, el proceso de PBF ha resultado ser el primero en superar esta barrera. Sin embargo, en lo que a calidad superficial se refiere, la fabricación aditiva aún no es capaz de conseguir el nivel de exigencia necesario en muchos casos. Por esta razón es preciso incorporar procesos que mejoren dicho acabado superficial y así mejorar el comportamiento a fatiga de los componentes. Los ensayos no destructivos son una disciplina indispensable para determinar la calidad de las piezas sin afectar a su integridad, y por lo tanto una herramienta de gran ayuda para hacer viable la incorporación de la fabricación aditiva en este sector. Sin embargo, los procesos de inspección se complican notablemente dadas las particularidades de este tipo de piezas, la elevada complejidad geométrica y su acabado rugoso. Es por ello, que aún se investigan nuevos métodos y metodologías que complementen los ya existentes en la inspección de esta nueva tipología de piezas. Por último, con el tiempo, se esperan conseguir mejoras en la calidad del material aportado y en la velocidad de producción.

Desde 2015, la industria aeronáutica se ha convertido en uno de los principales sectores del mercado mundial de la FA [Jyothish Kumar y Krishnadas Nair, 2017]. Algunas de las principales subcategorías de ingresos de la FA, incluidos los sistemas, equipos y materiales de FA, han

crecido continuamente tras la crisis financiera mundial de 2008 [Wohlers T, 2013], superando los 5.000 millones de euros de ingresos totales en 2015 [Wohlers Associates, 2017]. En 2016, la industria aeronáutica registró el mayor crecimiento en comparación con otros sectores, con un aumento anual del 1,6% en la tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR). En ese año, los ingresos mundiales del sector aeronáutico en FA ascendieron a 6.700 millones de dólares, lo que supone un crecimiento del 12,9% en comparación con los datos recopilados el año anterior [Jyothish Kumar y Krishnadas Nair, 2017].

En 2017, la empresa noruega Norsk Titanium fue la primera en recibir la aprobación de la FAA para fabricar componentes de FA, mediante técnicas DED, que experimentarían cargas de tensión en vuelo [Norsk Titanium, 2017]. Estos componentes, fabricados a partir de Ti6Al4V, fueron los primeros componentes estructurales de FA presentes en el Boeing 787 Dreamliner. Más tarde, en 2017, Airbus inició la producción e instalación de un soporte crítico de titanio para el A350 XWB. El componente, fabricado mediante técnicas de FA, forma parte del pilón del avión, la unión entre las alas y el motor [Caujolle, 2017].

Este interés por la FA ha provocado una tendencia alcista del mercado y un aumento de los ingresos totales y del crecimiento del mercado de las aplicaciones basadas en la FA [Wohlers Associates, 2017]. Según Liu et al. [Liu et al. 2017], se prevé que el mercado mundial de la FA aeronáutica, incluidos sus subcomponentes de ingresos, es decir, servicios, software, materiales y equipos aeronáuticos, se triplique entre 2014 y 2023 y alcance un volumen total de 1200 millones de euros. El segmento de las aleaciones metálicas dominó el mercado de la FA con una cuota de mercado del 58,25% en 2018.

Sin embargo, a finales de 2019 y principios de 2020 el mundo sufrió una pandemia global impredecible, denominada nuevo coronavirus (COVID-19) que se extendió por toda la población humana del planeta. La economía mundial se había visto afectada ya en el pasado por varios problemas financieros y energéticos, sin embargo, la actual crisis del COVID-19, afectó la economía de manera global, implicando a varios subsectores, como el aeronáutico, el automovilístico y el turístico. El Banco Asiático de Desarrollo estimó el 15 de mayo de 2020 que las pérdidas a nivel mundial podrían rondar entre los 5.800 y los 8.800 millones de euros, equivalentes al 6,4 % y el 9,7 % del producto interior bruto (PIB) mundial [ADB, 2020].

Con esta perspectiva, el sector del transporte internacional, que puede asociarse directamente con el sector aeronáutico, y se vio afectado relativamente en primer lugar, ya que los beneficios de estas empresas dependen en gran medida del movimiento. La industria aeronáutica se vio reducida principalmente por las restricciones en las actividades de aviación, los cierres

nacionales y las estrictas precauciones fronterizas [Amankwah-Amoah, 2020], [Muhammad et al. 2020]. Un ejemplo de este impacto es el estimado por la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA), que anticipó una pérdida de 113.000 millones de euros en los ingresos de la industria aeronáutica debido a un descenso de casi el 55% en el número de pasajeros kilómetro (RPK). El término RPK se determina multiplicando el número de pasajeros por los kilómetros que recorren en rutas nacionales e internacionales [Sobieralski, 2020]. Los datos estimados por La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) preveían un descenso de entre el 44 % y el 80 % en el número de pasajeros internacionales en 2020, en comparación con el año anterior [IATA. 2020].

Aunque el tráfico mundial de pasajeros ha ido aumentando gradualmente, a pesar de las diversas crisis y pandemias sufridas desde 1945, la industria y el sector aeronáutico nunca habían experimentado un declive tan drástico como se desprende de los datos del tráfico mundial de pasajeros comunicados por la OACI [ICAO. 2020]. Algunos expertos afirmaron que habría que esperar al menos 6 años para recuperarse del impacto de la pandemia [Martin et al. 2020]

Son numerosos también los sectores con los que la industria aeronáutica mantiene una amplia colaboración e interacción en lo que respecta a la cadena de suministro. Como resultado de ello, sectores como el de la fabricación sufrieron enormemente [ACI, 2020].

En la actualidad, y tras la respuesta global a la crisis de la COVID-19, se espera que el mercado mundial de la FA alcance más de 3.000 millones de euros en 2025, con una tasa de crecimiento anual constante del 20,24% durante el periodo previsto, es decir, de 2019 a 2025 [Market Research Future, 2021]. El principal factor que explica este crecimiento está relacionado con las ventajas y capacidades del proceso de FA, como la reducción del consumo de combustible y del peso, el aumento de la libertad de diseño y la fabricación respetuosa con el medio ambiente.

En la situación actual, se espera que el esfuerzo realizado por las empresas aeronáuticas para desarrollar motores de aviación impulse el mercado de la FA, lo que posiblemente se traduzca en la mayor CAGR en los próximos años [Market Research Future, 2021].

Las principales aleaciones metálicas que se utilizan en la industria aeronáutica son las aleaciones de aluminio, níquel y titanio. Estas aleaciones se utilizan sobre todo para fabricar inyectores y toberas de motores y componentes de propulsión.

II.2. El proceso DED-LB

De los procesos de fabricación aditiva mencionados, el presente documento se centrará exclusivamente en los casos de deposición de energía focalizada por láser, denominados como DED-LB, o L-DED. Para este tipo de procesos, existen diferentes formas de suministrar el material de aporte durante el mismo, por ejemplo, en forma de partículas sueltas o polvo, partículas aglutinadas en algún medio fluido y viscoso, o incluso hilo continuo. Este estudio se enfocará al uso de materiales metálicos, en especial a los de carácter aeronáutico debido a su gran interés industrial, y más concretamente a su suministro en forma de polvo.

Los procesos de fabricación aditiva de DED-LB, basados en inyección de polvo metálico, consisten en la focalización de un haz láser, que aporta energía térmica suficiente para producir la fusión de una zona localizada de un sustrato, o material base, mientras se inyecta el material sobre dicha zona. El desplazamiento del haz láser, junto con el aporte de material, generan lo que se denomina cordón de aporte. Los sucesivos cordones solapados entre sí crean una capa o recubrimiento de material adherido al sustrato, que sirve de material base para los siguientes cordones. Las distintas capas de material depositadas unas sobre otras dan como resultado la geometría final de la pieza.

La inyección del material se realiza a través de boquillas, que son las encargadas de concentrar y dirigir la proyección del aporte. Tal y como se ha mencionado, existen diferentes formas de suministrar dicho material, siendo los más frecuentes los formatos de hilo y polvo. En el primer caso, la concentración constante viene garantizada por la sección y continuidad del hilo de material de aporte. Sin embargo, este formato presenta otras complicaciones técnicas, como la direccionalidad y los defectos de inicio y fin del cordón. En el caso del suministro en forma de polvo, las condiciones cambian y se produce un efecto inverso al mencionado para el hilo, la direccionalidad y los inicios y finales de cordón no tienen mayor repercusión durante el proceso. Sin embargo, la concentración del material y el diámetro varían en función del diseño de la boquilla.

Aunque la boquilla es la encargada de dirigir el material de aporte a la zona de incidencia del haz láser, esta no posee mecanismos que impulsen dicho material. El flujo del material de aporte se genera con otros dispositivos auxiliares denominados alimentadores, y su funcionamiento depende fundamentalmente del formato del material utilizado.

Durante el proceso, se liberan humos y partículas, que resultan de la interacción del haz láser y los diferentes materiales. Evitar que lleguen a los instrumentos ópticos es de vital importancia

para prevenir el deterioro de los mismos. A su vez, existe la posibilidad de que sucedan reacciones químicas oxidantes, dadas las altas temperaturas del proceso y la presencia de oxígeno en la atmósfera. La protección frente a estas posibles reacciones se solventa mediante una atmósfera protectora de gas inerte que envuelva el proceso.

En los procesos de fabricación aditiva por DED-LB suceden una gran cantidad de fenómenos físicos y químicos que deben tenerse en cuenta para la obtención del resultado deseado. Todo ello sumado a la velocidad con que tienen lugar dichos efectos hace de su análisis una tarea de gran dificultad. Por esta razón, los procesos de DED-LB suelen caracterizarse experimentalmente, y sus parámetros de entrada suelen reducirse a los que permiten ser controlados de manera externa con los equipos auxiliares que intervienen.

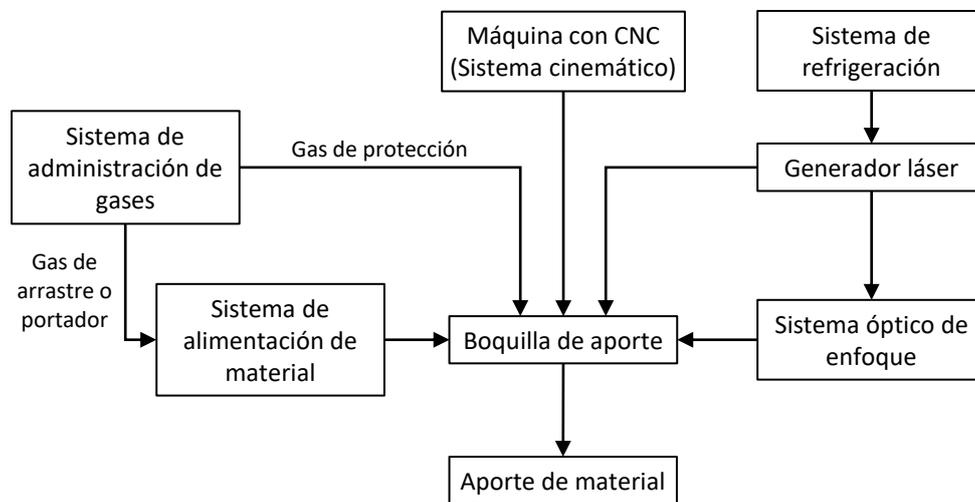


Figura II.4. Esquema de sistemas que intervienen en el proceso aditivo por Deposición de Energía Directa basado en fuente láser.

En la Figura II.4 se muestra un esquema con los elementos que intervienen en el proceso aditivo de DED-LB. Los detalles de cada una de las partes que componen el proceso y los parámetros y fenómenos en los que intervienen, se explicarán en sus propias secciones.

II.3. Descripción general de los equipos láser

El término *láser*, nace del acrónimo formado por su definición en inglés, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Se trata de un haz de radiación electromagnética, coherente y monocromático cuya longitud de onda puede variar en un amplio rango, que abarca desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. Sus fundamentos datan de 1915, y fueron expuestos por Albert Einstein [Einstein, 1917]; sin embargo, su primer prototipo no se materializó hasta 1960 [Maiman, 1960]. Desde entonces, se han desarrollado distintos tipos de láseres a medida que han ido surgiendo diferentes necesidades. La Figura II.5 presenta un esquema básico en el que se aprecian las partes esenciales que constituyen un láser de estado sólido, similar al modelo presentado en 1960, por Maiman. El proceso de generación del haz láser comienza con la excitación o bombeo del medio activo mediante el aporte de algún tipo de energía. Los átomos de este material pasan a un estado superior de excitación, liberando posteriormente la energía, en forma de fotones, cuando se relajan y vuelven a un nivel energético inferior [Svelto, 1989]. Si la energía se libera espontáneamente, los fotones generados no serán ni coherentes ni monocromáticos, dando lugar a la llamada emisión espontánea. Sin embargo, cuando los átomos regresan a su estado inicial gracias a un estímulo externo, los fotones generados tendrán una dirección y una longitud de onda determinadas.

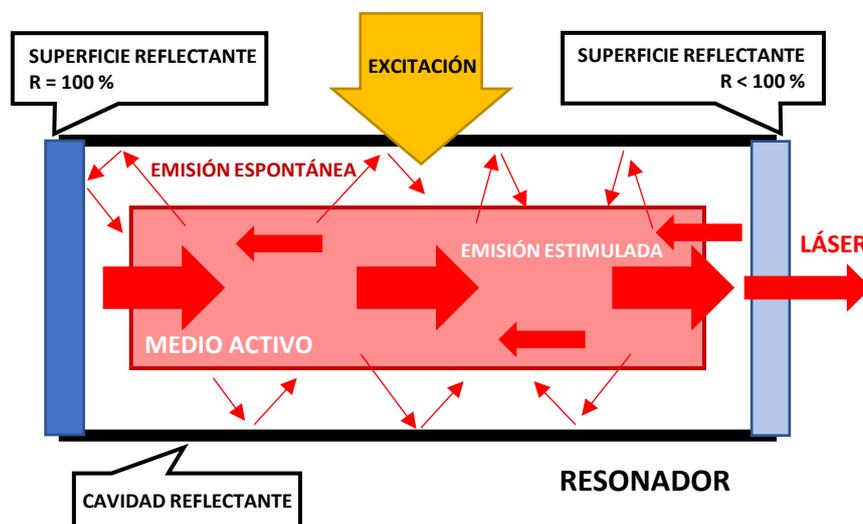


Figura II.5. Esquema del resonador y la generación láser de estado sólido.

Esta emisión estimulada es conducida a través del medio activo gracias a la cavidad reflectante en la que se encuentra alojado el mismo, y a la que se denomina resonador. En los extremos de dicha cavidad se disponen dos superficies que se distinguen por su capacidad de reflexión. Una de ellas refleja la totalidad de los fotones, mientras que la otra sólo un porcentaje [Chryssolouris,

1991]. La fracción de fotones que atraviesa la segunda superficie es lo que constituye el haz láser a la salida del resonador.

En la actualidad, los láseres están presentes en una gran cantidad de dispositivos, ya sea como sensores, en las comunicaciones, como fuentes de energía en procesos industriales, en el campo de la medicina, e incluso en pequeños electrodomésticos, por nombrar algunas [Ion, 2005] [Dausinger, 2004] [Wolbarsht, 1991] [Steen, 1991]. Su éxito se debe a sus características principales, que ya por separado son importantes, pero que juntas convierten a los láseres en herramientas polivalentes.

- Dependiendo de su construcción, pueden trabajar con diferentes longitudes de onda y, por lo tanto, adaptar su interacción a distintos materiales. [Ready, 1997]
- Los láseres poseen un alto grado de colimación de su haz. [Duley, 1983]
- Las ondas electromagnéticas del haz son coherentes y por lo tanto es conocido su ángulo de fase [Haken, 1983]. De esta manera es posible determinar la forma de la onda a lo largo del tiempo. Una propiedad importante en las comunicaciones o la interferometría, por ejemplo.
- Son una herramienta sin contacto, que no requiere ni ejerce fuerzas sobre la superficie en la que incide.
- Son una fuente de calor local y, por lo tanto, indicada para los procesos que requieren minimizar la afectación térmica del material.
- Pueden automatizarse de manera sencilla, y como consecuencia se implementan fácilmente en cualquier proceso.
- Dependiendo de su longitud de onda, el haz de láser puede ser conducido por elementos flexibles o sistemas especulares, y por lo tanto su posicionamiento goza de gran libertad.
- Poseen una alta repetitividad.

Los láseres pueden ser clasificados según su medio activo, distinguiendo cuatro grandes grupos: de estado sólido, de gas, de diodos (o semiconductores) y de colorantes (normalmente en medio líquido). El propio medio activo determina la eficiencia de la generación láser y la longitud de onda resultante [Dahotre et al. 2008]. La Tabla II.1 muestra ejemplos de cada uno de los tipos de láser mencionados y sus respectivas longitudes de onda más frecuentes. Los campos de aplicación de cada tipo de láser dependerán fundamentalmente de las mencionadas longitudes de onda con las que operan.

Láseres de estado sólido	Longitud de onda [nm]	Láseres de gas	Longitud de onda [nm]
Nd:YLF	1.047	XeF	351
Nd:YAG	1.064	KrF	249
Rubí	694	XeCl	308
Alejandrita	700 – 820	Láseres de diodo	Longitud de onda [nm]
Ti-Zafiro	700 – 1.100	AlGaAs	780 – 880
Er:YAG	2.940	InGaAs	980
Láseres de gas	Longitud de onda [nm]	AlGaInP	630 – 680
CO ₂	10.600	InGaAsP	1.150 – 1.650
HeNe	632,8	Láseres de colorantes	Longitud de onda [nm]
Argón	488 – 514,5	Estilbeno	403 – 428
Kriptón	520 – 676	Rodamina G6	570 – 640
HeCd	325 – 441,5	Cumarina 102	460 – 515
ArF	191		

Tabla II.1. Diferentes tipos de láser y su longitud de onda característica, clasificados por su medio activo.

En el caso de los láseres de estado sólido, como el que se observa en la Figura II.5, la excitación del medio activo se lleva a cabo mediante luz intensa o incluso láseres de diodos (en 1960, el primer prototipo empleaba lámparas helicoidales de xenón). En la actualidad, la mayoría de los modelos de estado sólido utilizan neodimio dopado con otros materiales como medio activo. En la Tabla II.1 se menciona uno de los materiales más empleado como medio activo, el Nd:YAG (por sus siglas en inglés *yttrium aluminum garnet*), cuya longitud de onda es habitualmente entre de 1.060 y 1.080 nm; lo que sitúa a este láser en el rango del espectro infrarrojo cercano, y por lo tanto invisible al ojo humano [Mans, 2011].

Un láser de disco es un tipo de láser de estado sólido en el que se busca mejorar la capacidad de evacuación de calor, aumentando la superficie total del medio activo en contacto con el sistema de refrigeración (Figura II.6). Así el medio activo es un disco de diámetro similar a los convencionales de barra con forma cilíndrica, sin embargo, con un espesor muy reducido (del orden de 100 μm), lo que mejora la capacidad de refrigeración. Los mecanismos de excitación aumentan en complejidad debido al número de veces que debe proporcionarse energía al medio activo. Sin embargo, de esta manera se obtiene una relación de superficie por unidad de volumen mayor, lo que supone un incremento de la capacidad para disipar calor. Este efecto contribuye a evitar problemas ópticos derivados de un exceso de temperatura en los componentes [Mans, 2011].

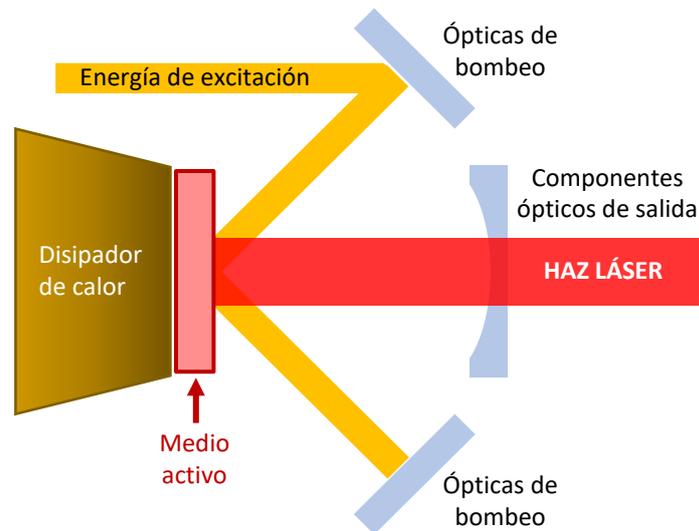


Figura II.6. Esquema del proceso de generación de un láser de disco de estado sólido.

En las últimas dos décadas, la tecnología también ha dado paso al desarrollo de los denominados láseres de fibra (Figura II.7), que con una mayor eficiencia y mejor calidad del haz han ido desplazando a los láseres de diodos y estado sólido convencionales. El funcionamiento de este tipo de láser implica el uso de dos tipos de fibra, una como medio activo o generador y otra que acorta los pulsos generados. La primera es una fibra dopada con tierras raras, y de sección reducida y gran longitud para aumentar la relación de superficie por unidad de longitud. Alternando estos dos tipos de fibra conectadas en serie, se consigue una ganancia de energía y unos pulsos muy cortos que se recirculan en el resonador hasta conseguir un estado estacionario [Mans, 2011] [Toyserkani. 2005]. La excitación del medio activo se realiza mediante láseres de diodos, lo cual contribuye a la reducción del tamaño de los equipos.

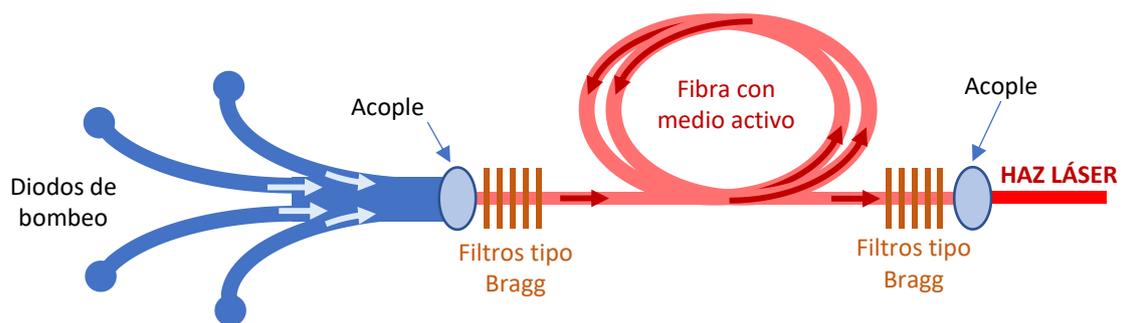


Figura II.7. Esquema del proceso de generación de un láser de fibra óptica.

Los láseres de diodos (en inglés, *Semiconductor Laser or Diode Laser*) suelen caracterizarse por un tamaño reducido, en algunos casos microscópico, y pueden disponerse en matrices que maximizan su densidad por unidad de superficie. Su funcionamiento se basa en uniones P-N, de materiales semiconductores, y la diferencia de energía de los electrones en las bandas de

valencia y conducción (Figura II.8) [Boucke, 2011] [Svelto, 1998]. La mayoría de los láseres de este tipo son empleados en componentes electrónicos, y su potencia suele ser del orden de milésimas de vatios, sin embargo, se han llegado a generar equipos de alta potencia que superan los 4 kW mediante la acumulación de fuentes individuales en *arrays* y *stacks*. Debido a la necesidad de acumular fuentes individuales, generalmente, este tipo de láseres muestran falta de simetría y coherencia en su haz, en comparación con los anteriores. Por esta razón suelen emplearse en aplicaciones de tratamientos superficiales, donde la focalización de energía es menos necesaria y, con frecuencia, como medios de excitación para otros tipos de láser como los mencionados anteriormente.

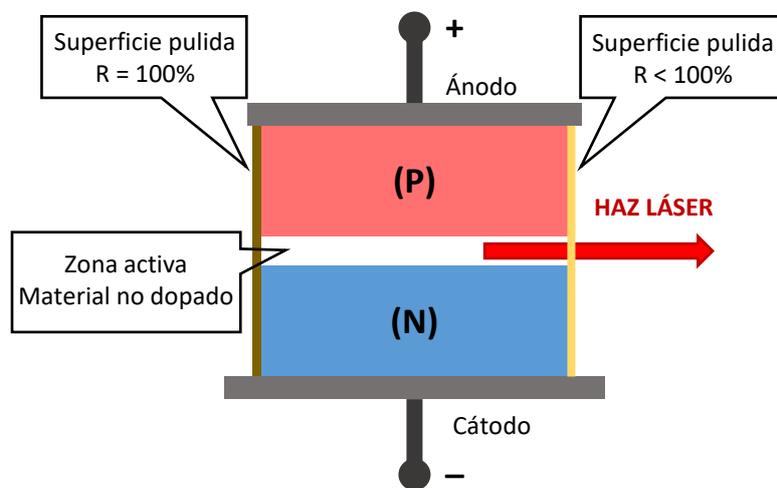


Figura II.8. Esquema del proceso de generación de un láser de diodo.

Entre los generadores que utilizan gas como medio activo, uno de los más empleados es el de CO₂ (Figura II.9). El medio activo, una mezcla de CO₂, He, y N₂, es excitado a través de impulsos eléctricos y emite un haz con una longitud de onda de 10.600 nm. Los láseres de CO₂ son capaces de alcanzar potencias de más de 40 kW; sin embargo, la reflectividad que los materiales metálicos muestran para esta longitud de onda es muy elevada.

Otro aspecto importante en los equipos láser de CO₂ es el guiado del haz, ya que debido a su longitud de onda no es posible el empleo de fibras ópticas, y debe optarse por soluciones basadas en superficies reflectantes. La complejidad de estas configuraciones a menudo resta versatilidad a este tipo de láseres, algo que no sucede con los de estado sólido o fibra.

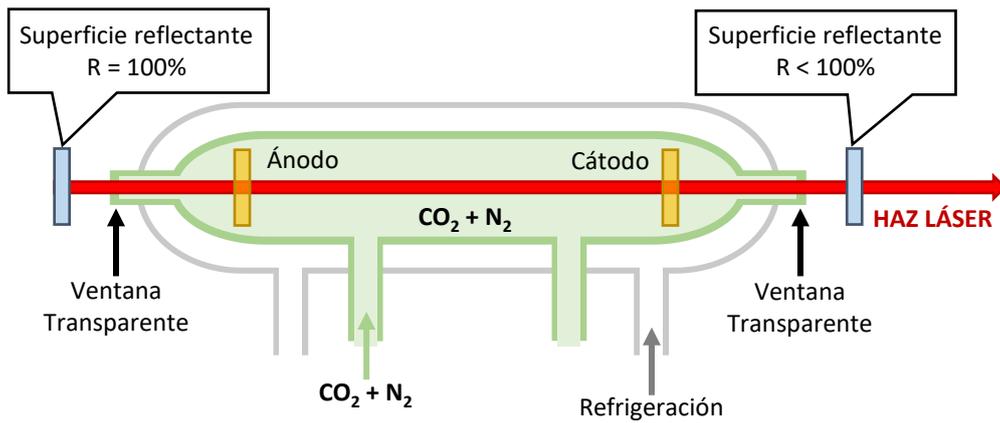


Figura II.9. Esquema del proceso de generación de un láser de CO_2

En resumen y a modo comparativo, la Figura II.10 muestra algunos tipos de láser, su rango de potencia y su calidad de haz. Además, de manera aproximada, se destacan las distintas tecnologías en las que se emplean cada uno de ellos.

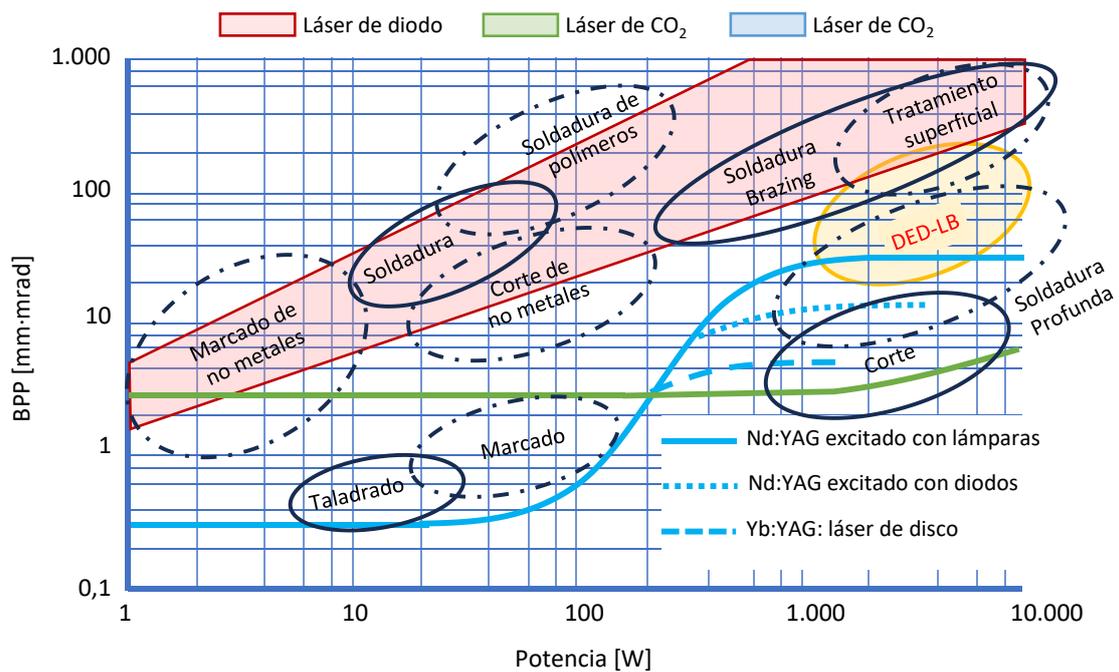


Figura II.10. Comparativa de diferentes tipos de láser y las tecnologías en las que se emplean. La tecnología de FA mediante DED-LB viene destacada en la zona amarilla.

II.4. Caracterización de los equipos láser

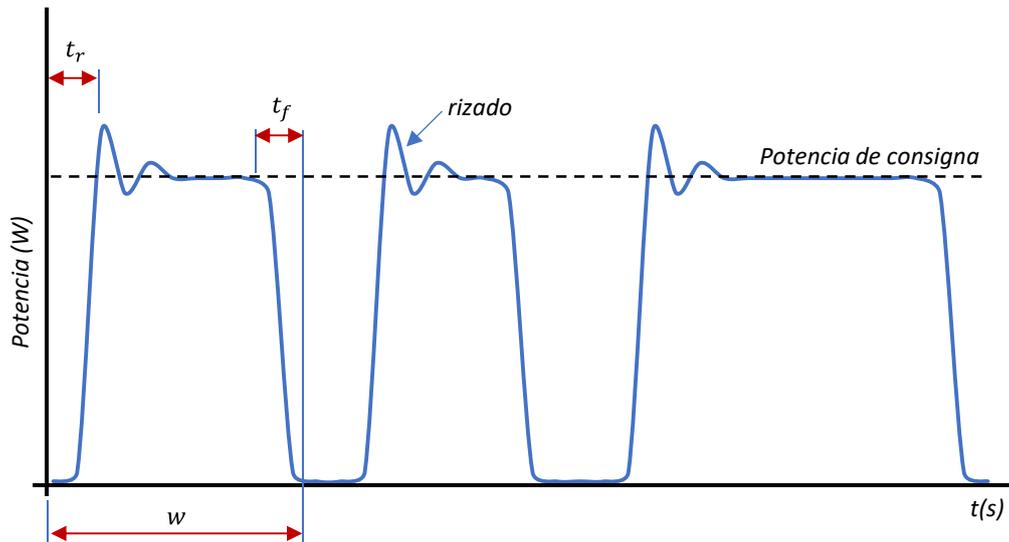
Las capacidades de un equipo láser vienen establecidas por varios parámetros que caracterizan su comportamiento. Dado que un haz láser puede ser generado de múltiples formas, cabe esperar que sus características sean igual de distintas. Por ello, es necesario definir una serie de parámetros que clasifiquen dicho haz y que permitan realizar comparativas posteriores. Existen parámetros que son propios del equipo generador del haz, y otros que son característicos del conjunto de generación y ópticas empleadas en su focalización.

Potencia (P): La potencia es uno de los principales parámetros que describen un equipo láser. Como su nombre indica, es la cantidad de energía que entrega por unidad de tiempo y por lo tanto se expresa habitualmente en vatios (W). Pueden encontrarse equipos que van desde milésimas hasta cientos de miles de vatios. En función del régimen con el que entregan la energía, los equipos láser pueden ser de tipo continuo, pulsado o modulado.

Régimen de emisión continua: Estos equipos son capaces de mantener la potencia constante, después de llegar a un estado estacionario en la generación del haz láser. Dicha generación requiere superar un umbral base de excitación del medio activo, y por lo tanto existe una potencia mínima de operación.

Régimen de emisión modulada: Los equipos láser que emiten en este régimen son similares a los de emisión continua. Sin embargo, disponen de la capacidad de emitir pulsos, gracias a una interrupción mecánica u óptica del haz. La forma de dichos pulsos se indica con detalle en la Figura II.11. La duración de un pulso es el tiempo durante el cual el láser está emitiendo, independientemente de la potencia entregada. El ciclo de trabajo es el producto de la duración de dichos pulsos por la frecuencia de los mismos. La potencia entregada en los equipos de emisión modulada es igual al producto de la potencia programa por el ciclo de trabajo.

Régimen de emisión pulsada: A diferencia de los equipos que trabajan en régimen modulado, en este tipo de láser la entrega de energía generada se realiza en una secuencia de pulsos cortos de una frecuencia determinada. La potencia entregada por pulso puede ser significativamente mayor cuanto menor sea el ciclo de trabajo. Es decir, la potencia pico que puede entregar un pulso es mayor a medida que la duración de dicho pulso es menor, para una frecuencia dada. Existen equipos que pueden ofrecer duraciones de pulsos muy cortos que van desde los nanosegundos, hasta los pico-, femto-, y attosegundos. Los distintos parámetros que caracterizan el comportamiento de estos equipos se muestran en la Figura II.12 y las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3.

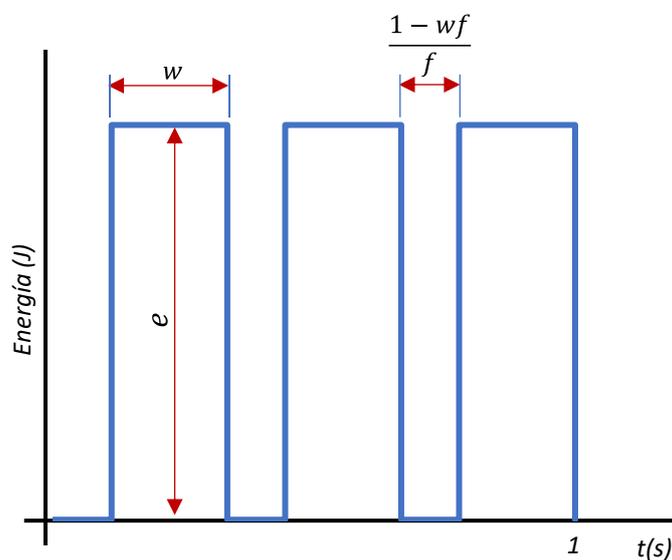


$w =$ Duración de pulso

$t_r =$ Tiempo de subida

$t_f =$ Tiempo de caída

Figura II.11. Modulación de pulso y principales características.



$w =$ Duración de pulso

$f =$ Frecuencia de pulso

$DC =$ Ciclo de trabajo

$e =$ Energía de pulso

$P_m =$ Potencia media

$P_p =$ Potencia pico

Figura II.12. Características principales de un láser en régimen pulsado.

$$DC = w \cdot f \quad (2.1)$$

$$P_m = e \cdot f \quad (2.2)$$

$$P_p = \frac{e}{w} \quad (2.3)$$

Longitud de onda (λ): En una onda electromagnética, la longitud de onda se corresponde con la distancia entre dos máximos del campo eléctrico (Figura II.13). Los materiales, en general, muestran una reflectividad, absorptividad y transmitancia diferentes, dependiendo de la longitud de onda del haz que incide sobre ellos. Por lo tanto, la energía que es capaz de aportar un haz láser depende fundamentalmente de la reflectividad que muestran los materiales para su longitud de onda característica. En el caso particular de los metales, la transmitancia es prácticamente cero y, por lo tanto, se puede asumir que la energía absorbida es igual a la diferencia entre la emitida por el haz y la reflejada por la superficie del material.

En la Figura II.14 y Figura II.15, se muestran respectivamente el espectro electromagnético según longitud de onda y frecuencia y una gráfica con la reflectancia para algunos materiales metálicos.

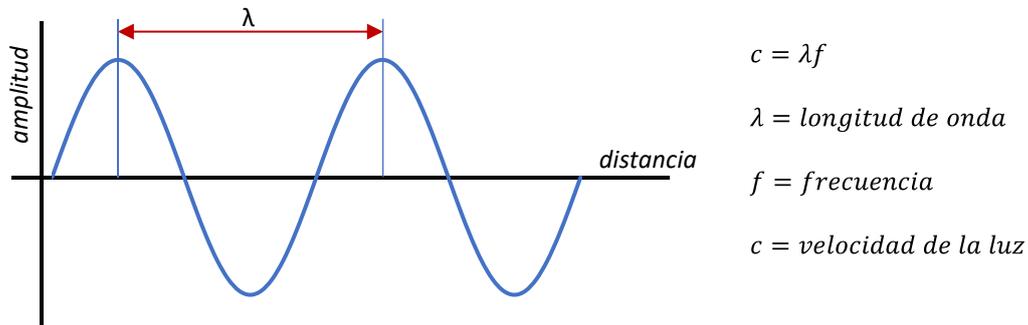


Figura II.13. Características de una onda electromagnética en el vacío.

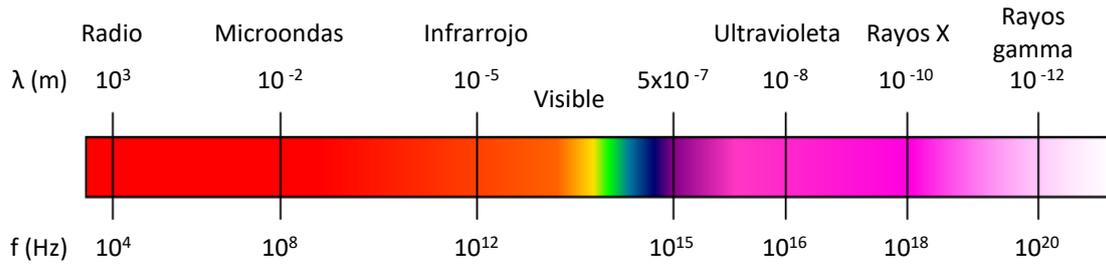


Figura II.14. Clasificación de las ondas electromagnéticas.

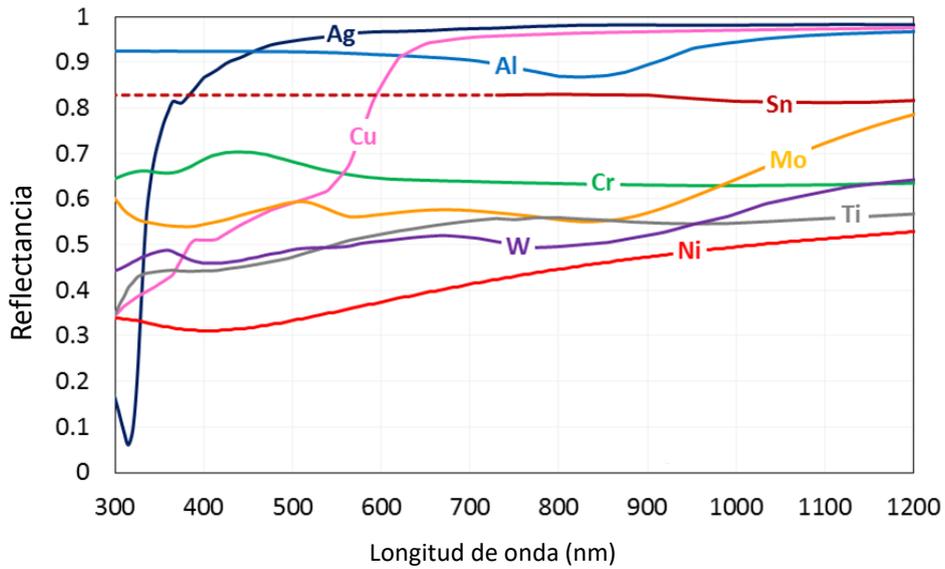


Figura II.15. Reflectancia de diferentes materiales según la longitud de onda incidente.

Distribución de energía: Esta característica representa y cuantifica la forma y la distribución de energía de la sección transversal, al eje de propagación, del haz láser. Estos perfiles, o mejor denominados como modos transversales (Figura II.16), se definen para una distribución gaussiana como TEM_{xy} (por las siglas en inglés de *Transverse Electromagnetic Modes*), donde los subíndices “x” e “y” reflejan el número de nodos que existen en los respectivos ejes; así el modo TEM_{00} corresponde con una distribución Gaussiana pura. El resto de los modos se ejemplifican en la gráfica II.1, al igual que otras posibles distribuciones no Gaussianas tales como la “*top-hat*” o incluso distribuciones “*ad-hoc*” (Figura II.17).

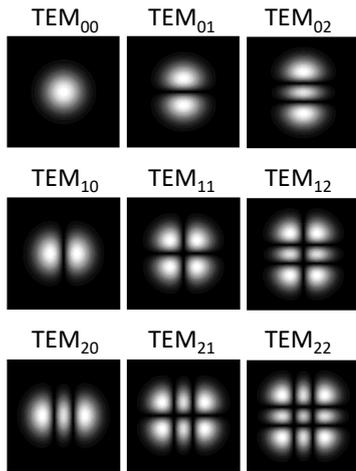


Figura II.16. Modos transversales

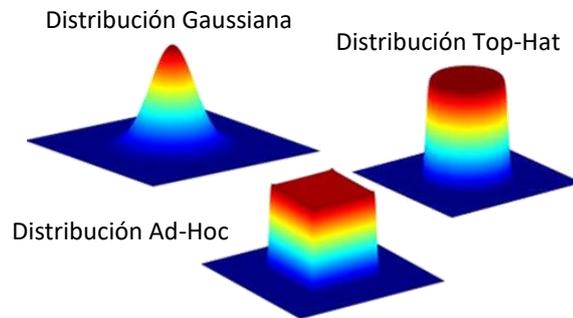


Figura II.17. Distribución gaussiana, top-hat, y ad-hoc.

Dimensiones del haz: Para los casos en los que la distribución de energía sea “top-hat”, las dimensiones de la sección transversal del haz se definen según su geometría. De esta manera, un haz de forma rectangular o cuadrada se define por las dimensiones de sus lados, mientras que un haz con forma circular se define por su diámetro. Cuando la distribución de energía presenta un perfil gaussiano y la forma del haz es circular, la dimensión característica del diámetro es igual al valor para el cual la energía se ha reducido en un factor de $1/e^2$, de su valor máximo (Figura II.18). Para otros casos se puede recurrir a diferentes normas, como puede ser la ISO 11146.

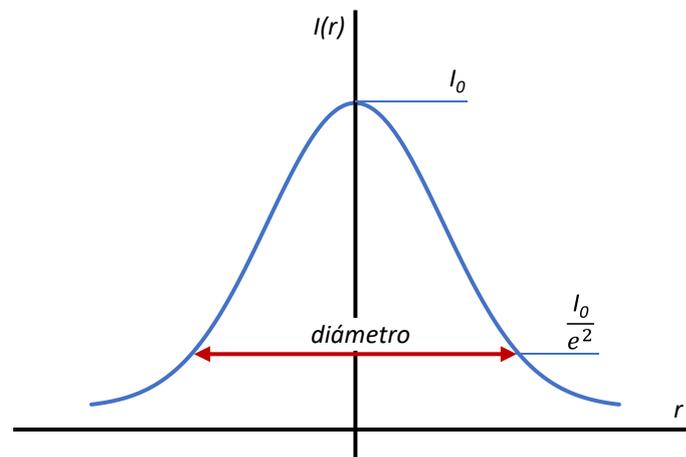


Figura II.18. Distribución gaussiana y medidas características.

Calidad del haz: En términos generales, existen dos parámetros que describen la manera en que el diámetro del haz varía en función de la distancia recorrida. En ambos casos se observa una dependencia del, denominado, ángulo de divergencia (ecuación (2.6)). El “*Beam Parameter Product*” (BPP), que es válido para cualquier tipo de láser, es el producto del diámetro por el

semi-ángulo de divergencia (ecuación (2.4)). Este parámetro se mantiene constante incluso después de pasar por los elementos ópticos de enfoque del láser, y de ahí su interés. Mientras que el “Factor de propagación” del haz (Q) o su recíproco, el “Factor de calidad” (M^2), viene definido por la ecuación (2.5), donde “ λ ” es la longitud de onda del haz, y “ n ” es el índice de refracción. Para un haz de tipo Gaussiano el valor de M es igual a la unidad. El esquema de la Figura II.19 muestra un perfil de propagación de un haz láser, así como sus principales características.

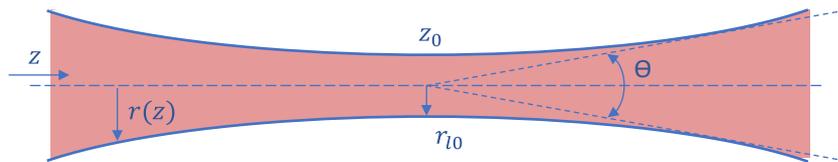


Figura II.19. Perfil de propagación del haz láser

$$BPP = \phi_0 \cdot \theta_0 = \phi_1 \cdot \theta_1 \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{Q} = M^2 = \frac{n \cdot \pi \cdot r_{0l} \cdot \theta}{2 \cdot \lambda} = \frac{BPP \cdot n \cdot \pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

$$r_l(z)^2 = r_{0l}^2 + 4 \cdot \theta^2 \cdot (z - z_0)^2 \quad (2.6)$$

II.5. Gas empleado en el proceso de DED-LB

Para los procesos de DED-LB se emplea un haz láser capaz de fundir los materiales metálicos que intervienen en la fabricación. Durante ese momento los gases presentes en el entorno pueden producir reacciones químicas no deseadas; siendo uno de los casos más frecuentes el que se genera con los gases presentes en el aire. Las altas temperaturas junto al oxígeno de la atmósfera producen la oxidación de los materiales metálicos presentes en el proceso. Para evitar este tipo de fenómenos, es necesario recurrir al uso de gases inertes, que eviten este tipo de reacciones y que protejan el proceso, desplazando al resto de los gases fuera de la zona de acción del haz láser.

Para el caso de los procesos de DED-LB basados en inyección de polvo metálico, existen al menos dos corrientes de gases que deben evaluarse: gas de protección y gas de arrastre o portador. Para ayudar a mejorar la concentración del polvo metálico en la zona de aporte, también puede existir una tercera corriente de gas auxiliar, de formación o envolvente.

El flujo de gas de protección tiene dos funciones fundamentales. La primera es la de proteger el proceso con una atmósfera inerte, que evite las reacciones químicas provocadas por las altas temperaturas que se alcanzan en la zona de fusión del material. La segunda función es la de evitar que los humos y partículas del proceso alcancen los elementos ópticos situados en las cercanías.

Existe un caso exclusivo de protección de los elementos ópticos que consiste en una corriente de gas, paralela a dichos elementos, y que arrastra a gran velocidad cualquier partícula que viaje hacia ella. Al ser un flujo de gas que cruza por completo el camino óptico del haz se denomina por su término en inglés como *crossjet* (Figura II.20).

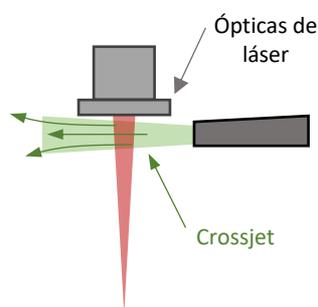


Figura II.20. Esquema del uso de un flujo de gas tipo crossjet.

El flujo de gas de arrastre, o flujo de gas portador, es el encargado de transportar las partículas desde el alimentador de polvo hasta la boquilla e impulsar el material, a través de esta, hasta su salida, alcanzando la zona de fusión creada por el haz láser. Al igual que sucede con el flujo de

gas de protección, esta corriente genera turbulencias en la salida de la boquilla, y por lo tanto su caudal debe mantenerse en los márgenes de diseño de la misma para evitar distorsionar la distribución resultante de polvo.

Para ilustrar estos dos casos se presenta la Figura II.21 que muestra como la corriente de gas de protección entra en la boquilla de aporte y se emplea para generar ambos efectos. Es necesario destacar también, que esta corriente produce un efecto sobre la concentración del polvo. Su presencia y flujo másico producen turbulencias en la salida de la boquilla, a la vez que alejan el punto de concentración máximo de polvo.

Por último, es posible encontrar en el diseño de algunas boquillas una tercera corriente de gas, que sale envolviendo por completo a las demás, y cuyo propósito es doble. Uno de sus propósitos es evitar la dispersión de las partículas de polvo y mejorar su concentración. Y el segundo consiste en mejorar las condiciones de protección ante las reacciones químicas de oxidación del proceso.

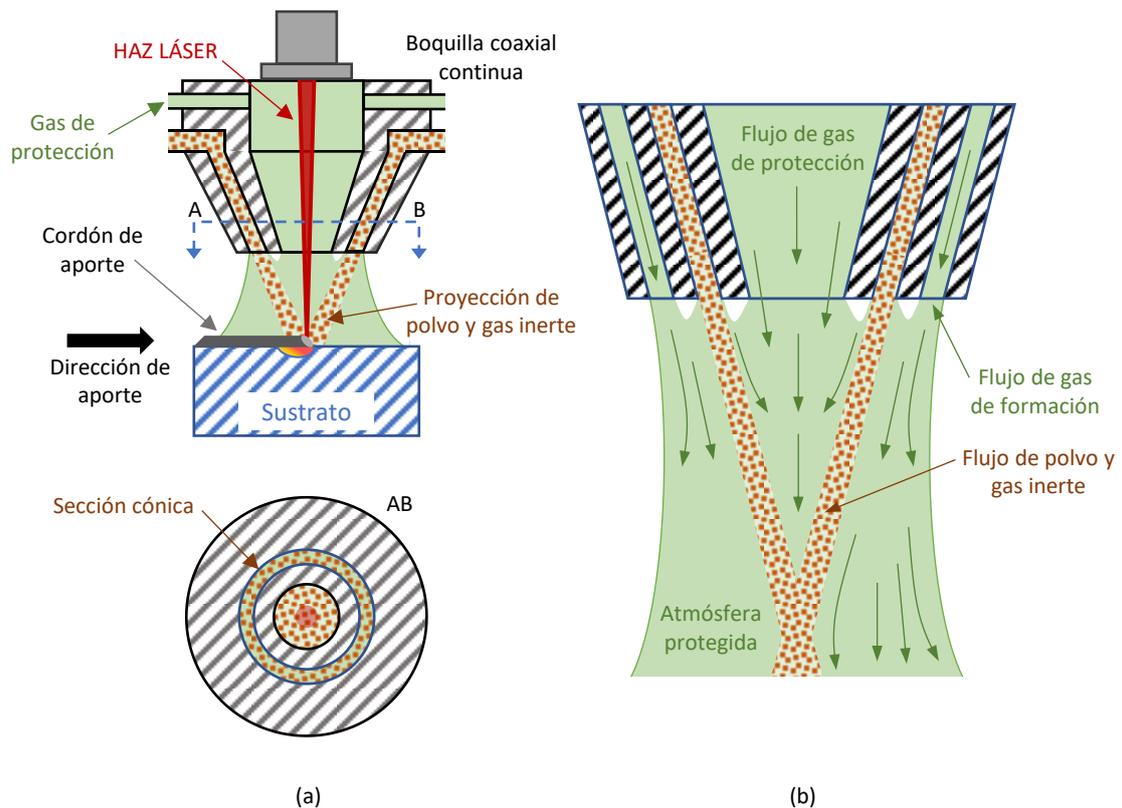


Figura II.21. (a) Esquema de boquilla coaxial continua y flujos de gases y polvo. (b) Detalle de esquema de salida de boquilla coaxial continua con gas de formación.

II.6. Descripción general de sistemas de alimentación de polvo

Los alimentadores de polvo son los dispositivos encargados, no sólo de asegurar el suministro, sino también de la estabilidad del mismo. Las diferencias que existen en la forma, tamaño y propiedades físicas y químicas de los distintos polvos, hacen prácticamente imposible presentar una única solución que consiga trabajar, con todos los posibles materiales, a un régimen estacionario y continuo. Los diferentes alimentadores se agrupan en cuatro grandes categorías, según su principio de funcionamiento:

- Gravedad
- Mecánicos
- Lecho fluidizado
- Vibración

En el caso de los alimentadores por gravedad, el polvo se almacena en un recipiente tipo tolva, y se dispensa por el mismo principio que en un reloj de arena. La fuerza de gravedad es el principio motor que desaloja el polvo del dicho recipiente (Figura II.22. (a)). Existen alimentadores que cuentan con una célula de carga que registra el peso de la tolva, para poder controlar el caudal másico que la abandona, y así regular el flujo de polvo que se alimenta. Para realizar este control es necesario que el alimentador disponga de una salida regulada, o algún otro método que permita actuar sobre la cantidad de polvo que sale de la tolva. Para este fin existen diferentes soluciones entre las que destaca la de disco dosificador, por ser una solución sencilla y ofrecer continuidad en el flujo másico (Figura II.22. (b)). El polvo se deposita en el interior de una ranura, practicada sobre la superficie plana de un disco. La geometría de la ranura y la velocidad de giro del disco proporcionan un método regulable para establecer el caudal volumétrico y controlar la cantidad de polvo que se suministra.

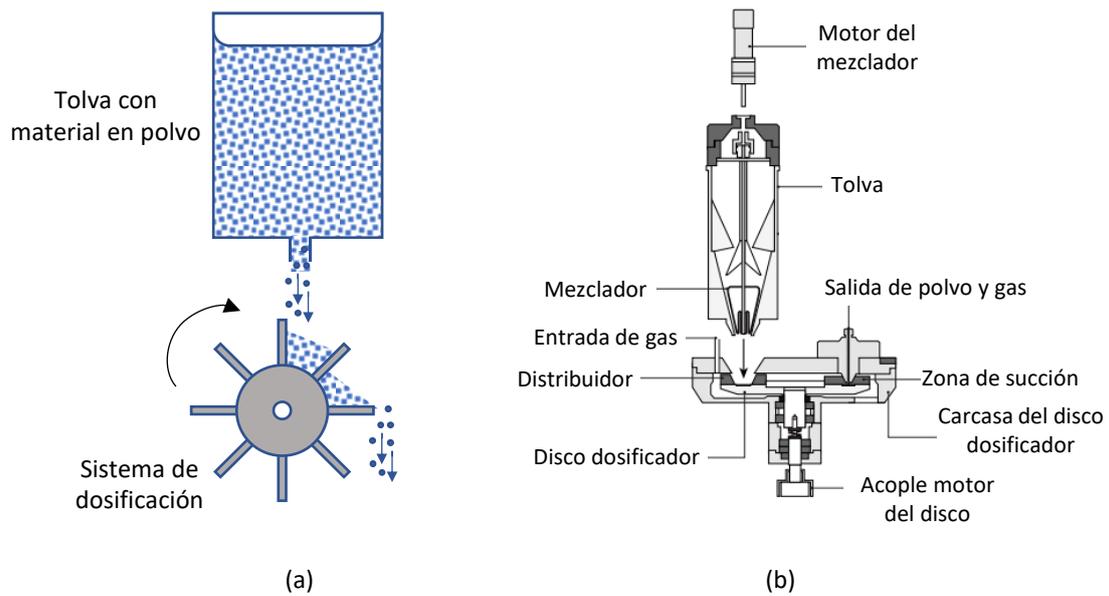


Figura II.22. (a) Esquema general de un sistema de alimentación por gravedad con dosificador. (b) Ejemplo de dosificador de disco, típico en alimentadores por gravedad.

Los alimentadores mecánicos, o de tornillo sin fin, alojan las partículas en el paso del mecanismo y las transportan gracias al movimiento giratorio (Figura II.23). Se pueden emplear tornillos de diferentes pasos y modificar la velocidad de giro para ajustar el flujo de polvo, siendo este aspecto una de sus principales ventajas. Estos tipos de alimentadores no requieren de una diferencia de presión de gas para el arrastre de las partículas a través del mecanismo, pero sí para el transporte del polvo desde la salida del alimentador hasta la boquilla. En ocasiones, las partículas pueden resultar abrasivas para el material del tornillo y producir desgastes e inconvenientes, contribuyendo a la posibilidad de fallo e incremento de los costes de mantenimiento y reparación.

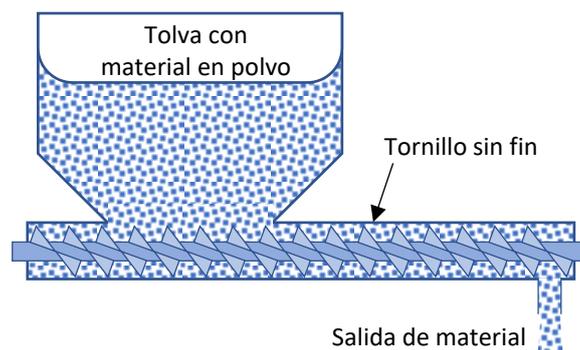


Figura II.23. Esquema de alimentador mecánico por tornillo sin fin.

Un lecho fluidizado se consigue tras dispersar una cantidad de gas suficiente a un lecho de polvo, de manera que las partículas queden suspendidas en el gas y se comporten como parte del fluido. Este fluido, mezcla de gas y partículas, es dirigido hacia un orificio o tubo conductor que se encuentra en el recipiente que confina la mezcla. En esta etapa otra corriente de gas arrastra

el fluido hasta la boquilla (Figura II.24). La escasa presencia de partes móviles y mecanismos necesarios para este proceso reducen las tareas de mantenimiento y la necesidad de recambios. A su vez, los alimentadores basados en lecho fluidizado suministran un caudal continuo y regulable mediante las diferentes presiones y flujos de gas, así como de los orificios de salida.

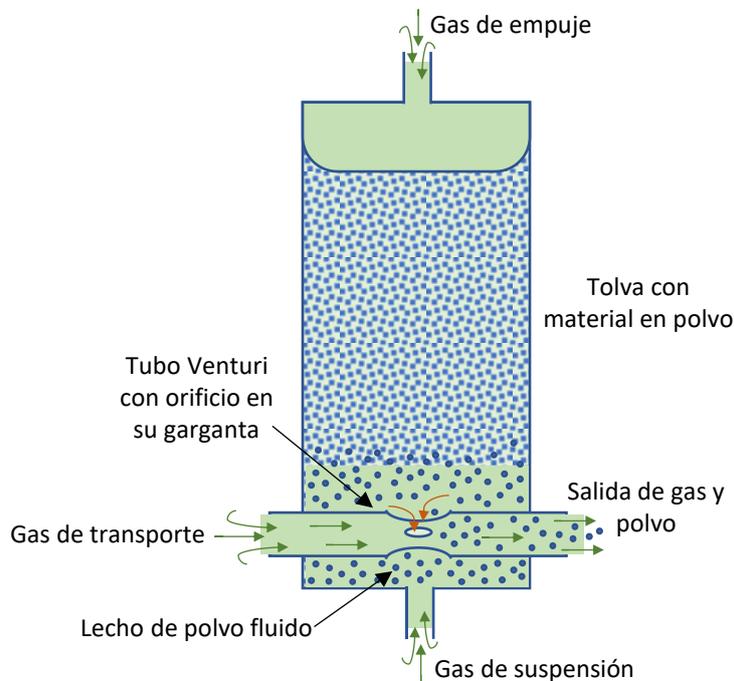


Figura II.24. Esquema de alimentador de lecho fluidizado de polvo.

En los alimentadores por vibración el polvo abandona la tolva y se deposita sobre unas canalizaciones de superficies planas que vibran con frecuencias y amplitudes específicas para cada tipo de polvo y caudal (Figura II.25). La oscilación de las canalizaciones hace que el polvo fluya y no se acumule, para conseguir un flujo continuo. Al igual que en el resto de los alimentadores, es necesaria una corriente de gas que arrastre las partículas de polvo a la salida del mismo. La precisión de estos alimentadores puede aumentarse mediante diferentes etapas de vibración, haciendo que el polvo pase por distintas canalizaciones con su propia amplitud y frecuencia.

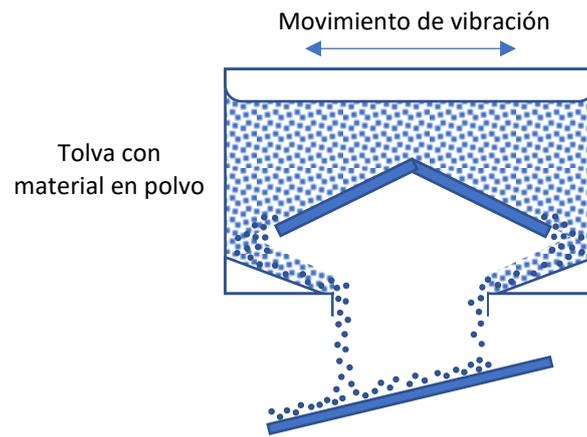


Figura II.25. Esquema de alimentador de polvo por vibración.

II.7. Polvos metálicos

En el contexto de la fabricación aditiva, el material de aporte es objeto de mucho estudio, ya que de este depende la calidad de las piezas resultantes. La densidad, el acabado superficial, la repetitividad del proceso, la ausencia de defectos y otros tantos factores dependen directamente del material utilizado durante el proceso.

Para el caso de los materiales presentados en forma de polvo metálico, existen dos vías distintas de análisis. La primera se encarga de evaluar las partículas del polvo para caracterizar su calidad. Son objeto de estudio su forma, composición química, humedad, porosidad, y sobre todo el tamaño de las partículas y su distribución estadística. El segundo caso es el estudio del polvo metálico como conjunto de partículas, donde la fluidez, la densidad aparente y la compactación son las características en las que se centra su análisis.

Como norma básica se puede establecer que la composición química debería ser lo más homogénea posible y que las partículas deberían estar libres de humedad y porosidad para conseguir la mayor densidad en las piezas resultantes. En cuanto a la forma y tamaño de las partículas se observa, como norma general, que los procesos de DED-LB utilizan tamaños inferiores a 150 micrómetros. Cuando las partículas se presentan en esta magnitud o inferiores existen varios fenómenos que deben ser tenidos en cuenta. Por una parte, cuanto menor es el tamaño de las partículas mayor será la resolución de las piezas obtenidas, a la vez que mejora su acabado superficial. Sin embargo, las fuerzas electrostáticas que se generan con un tamaño de partículas reducido son mayores y por lo tanto empeora la fluidez del polvo y genera aglomeraciones no deseadas. Por otra parte, la distribución del tamaño de las partículas también influye en el proceso. Cuanto más homogénea sea la distribución de partículas mayor es la fluidez del polvo, pero peor es su capacidad de compactación y por lo tanto aumenta el riesgo porosidad en las piezas. Atendiendo a razones similares a las anteriormente mencionadas, se puede establecer que la forma idónea para las partículas de polvo es la esférica, ya que favorece tanto la fluidez como la compactación.

En la industria de hoy en día, existen cuatro métodos diferentes de fabricación para el polvo metálico. De estos métodos resultan la distribución de tamaño, la forma y la composición química del polvo, por lo que algunos serán más adecuados que otros para la fabricación aditiva.

Atomización por agua: para este proceso se pulveriza agua a alta presión (500 – 1500 bares) contra el metal fundido para crear micropartículas de material. El proceso genera un amplio espectro de tamaños de partículas, que pueden llegar hasta 500 micrómetros. A pesar de su alta

productividad, este método genera partículas de formas irregulares y con gran cantidad de satélites, que no son otra cosa que partículas más pequeñas adheridas a la central, haciendo muy difícil su incorporación a los procesos de fabricación aditiva. Por último, es un método que no puede emplearse para materiales altamente reactivos.

Atomización por gas: en este caso, la atomización se produce al cruzar un flujo de gas a presión (5 – 50 bares) con una corriente de metal fundido. La solidificación de las gotas de metal fundido general el polvo metálico, que tiene una forma esférica y con una menor presencia de satélites, si lo comparamos con la generación por atomización de agua. El tamaño de las partículas también posee un amplio rango de variación y pueden tener un tamaño de hasta 500 micrómetros. Los gases empleados para este proceso suelen ser aire, argón, nitrógeno o helio. Este método posee una alta tasa de producción, y también es adecuado para materiales altamente reactivos, como el titanio, cuando se emplean gases inertes, como el argón o el helio.

Atomización por plasma: la creación de microgotas de metal fundido se consigue utilizando argón en estado de plasma para fundir y atomizar el material en bruto. La fusión ocurre a más de 10.000 °C, y la atomización por este método genera partículas de menos de 200 micrómetros y gran esfericidad. Este proceso crea un rango de tamaños de partículas más acotado, pero su coste es mayor que los anteriormente mencionados.

Atomización centrífuga: en este caso, el material base fundido interactúa con un disco giratorio para crear las microgotas de este proceso, que puede generar distribuciones de tamaños de partículas muy acotados. En los casos en que se opere dentro de una atmósfera de gas inerte, la energía utilizada en este método de fabricación es menor que la necesaria para los procesos de atomización por agua o gas. El polvo de metal obtenido presenta una oxidación ligera, y el coste del proceso es elevado, más aún cuando la contaminación por wolframio pueda suponer un problema.

II.8. Descripción general de boquillas en procesos DED-LB

Las boquillas (o *nozzles*, según su término en inglés) destinadas a los procesos DED-LB, se diferencian principalmente por el formato del material de aporte, que puede ser en forma de hilo, polvo, combinación de polvo más aglutinante u otros. Como ya se ha mencionado, en este documento se prestará especial atención al uso de los polvos metálicos, y en concreto los destinados a la industria aeronáutica.

Las boquillas son los elementos encargados de dirigir el polvo hasta la zona en la que el láser incide sobre el material base. Para dicho propósito el polvo debe ser arrastrado por un gas portador, también denominado gas de arrastre, que transporta las partículas desde el alimentador hasta la zona de aporte. Los distintos diseños de las boquillas juegan un papel crucial en la eficiencia del proceso de aporte por DED-LB, ya que de estos depende la capacidad de concentrar el polvo de manera homogénea y con la suficiente repetitividad, sobre un área tan reducida como la que barre el haz del láser. Siendo, además, que todo el material que cae fuera de dicha área no pasa por el proceso de fusión y adherencia, y por lo tanto se considera una pérdida del proceso en forma de residuo.

Las distintas boquillas pueden clasificarse, según el número de inyectores, en discretas o continuas (Figura II.26). Y dependiendo de la posición de estos inyectores con respecto al eje de propagación del haz láser, se diferencian entre coaxiales o laterales.

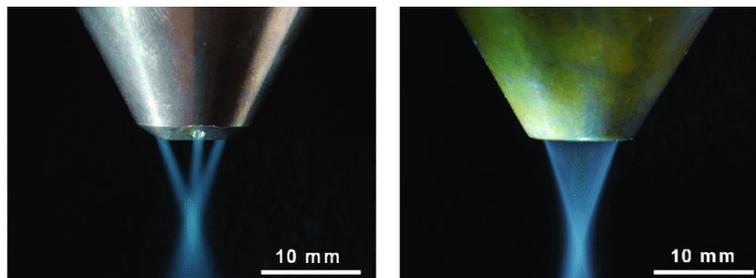


Figura II.26. Fotografía de la salida de polvo de dos boquillas coaxiales. (a) Discreta. (b) Continua

Una boquilla discreta está formada por uno o varios inyectores que son los encargados de concentrar el polvo sobre la zona fundida del sustrato. Cuando se trata de un único inyector el polvo alcanza al haz láser por un lateral. En cambio, si la boquilla posee varios inyectores, estos se sitúan de tal manera que sus proyecciones de polvo intersequen al haz láser en el mismo punto, dando lugar a lo que se conoce como boquillas discretas coaxiales. La distribución de polvo depende, no sólo, del número de inyectores sino también de la dirección del aporte. Esta dependencia disminuye a medida que se incrementa el número de inyectores, como es lógico, ya que se tiende a una distribución de polvo más homogénea y gaussiana, a la vez que se supera

el problema de la direccionalidad. El compromiso entre número de inyectores, eficiencia y complejidad de diseño suele establecerse para tres o cuatro de estos inyectores, y son los casos más presentes en el mercado. La forma de los inyectores varía de un fabricante a otro, sin embargo, su geometría base suele ser una especie de lanza con un orificio interior de unos pocos milímetros de diámetro, por el que viaja el polvo. Existen también configuraciones en los que los inyectores son interiores, y no se encuentran a la vista, y por lo tanto sólo se componen de un orificio practicado directamente en el cuerpo de la propia boquilla. La geometría y el acabado de estos orificios, así como la forma exterior de la lanza o inyector son los responsables de la forma y calidad del flujo de polvo; ya que de ello depende el resultado de la dinámica de fluidos de los gases que arrastran las partículas. En la Figura II.27 se muestran esquemas de las configuraciones discretas, lateral y coaxial.

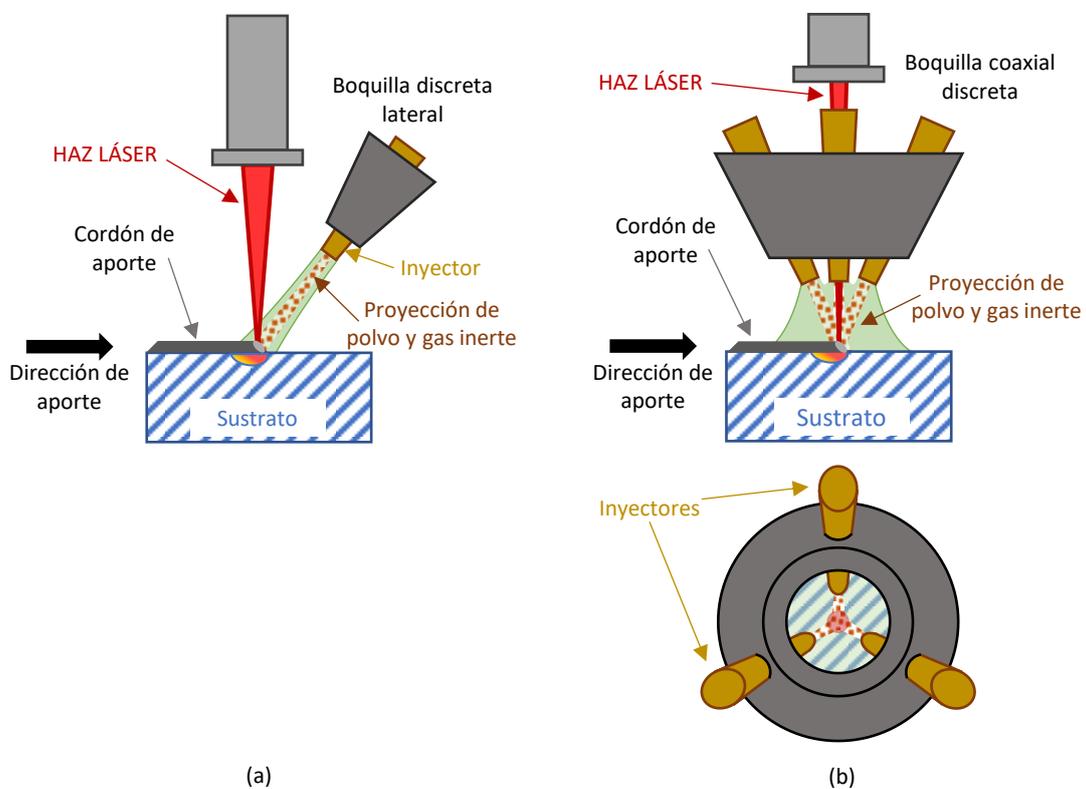


Figura II.27. (a) Esquema en operación de una boquilla discreta lateral. (b) Esquema de operación de una boquilla coaxial discreta

Las boquillas coaxiales continuas (Figura II.28), son el caso límite en el que el número de inyectores se ha incrementado hasta no distinguir orificios discretos sino un anillo completo de salida. En este caso, la geometría del conducto que dirige el polvo a través de la boquilla es el resultado de la separación que existe entre dos paredes cónicas. La complejidad en el diseño de este tipo de boquillas aumenta considerablemente, sin embargo, suele verse compensada por las ventajas que aporta. El problema de la direccionalidad desaparece por completo, al tiempo

que se consigue una distribución gaussiana y homogénea. La mayor desventaja que presentan las boquillas continuas frente a las discretas es su capacidad de trabajo con grandes ángulos de inclinación, con respecto a la vertical. En el caso de las boquillas discretas, las partículas de polvo llegan desde el alimentador y se subdividen en el número de entradas que tiene la boquilla, que suele coincidir con el número de inyectores, y pasan a través de estos sin mayores obstáculos. Mientras que, en las boquillas continuas, el flujo que llega desde el alimentador primero penetra en una cámara de mezcla, donde se homogeniza en forma de anillo para luego ser transportado hasta la salida. Las pérdidas de carga, en el flujo de transporte del polvo, suelen ser mayores en la cámara de mezcla que en la división de las entradas de los inyectores. Por lo tanto, las boquillas continuas presentan, a su salida, una menor velocidad en las partículas de polvo y, por lo tanto, una menor inercia para continuar con su trayectoria.

Ninguna de las configuraciones mencionadas es capaz de regular el caudal de material que circula por ellas, siendo esta una tarea que se lleva a cabo previamente en el alimentador.

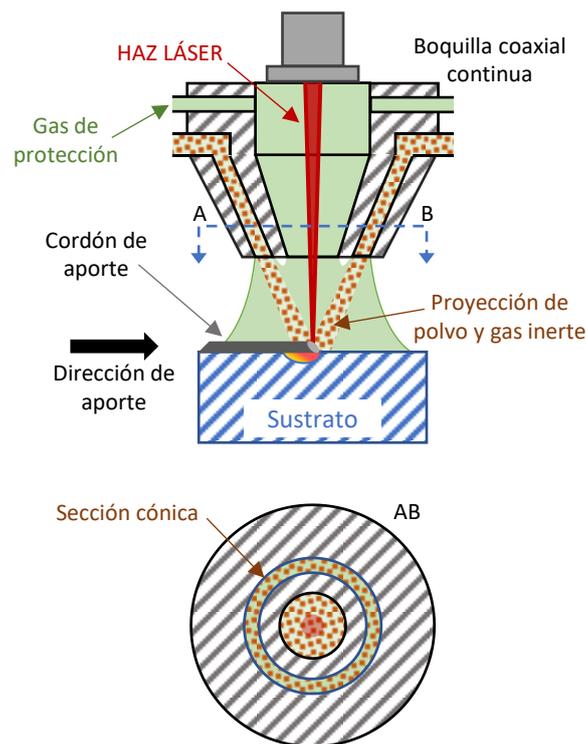


Figura II.28. Esquema en operación de una boquilla coaxial continua.

II.9. Parámetros fundamentales del proceso DED-LB

Como se ha mencionado anteriormente, en los procesos de fabricación aditiva que involucran energía focalizada y deposición de material, intervienen una gran cantidad de parámetros cuya relación e interacción no siempre viene definida. En numerosas ocasiones los parámetros de entrada del proceso se establecen de manera experimental. Sin embargo, existen relaciones conocidas y documentadas de algunos de los parámetros más importantes, y el impacto que generan en el resultado final del proceso. Los diferentes parámetros que intervienen en un proceso de DED-LB, se pueden organizar en tres categorías bien diferenciadas:

- Parámetros de entrada:
 - Láser: potencia, longitud de onda, distribución de energía, dimensiones del haz.
 - Material de aporte: flujo másico, fluidez del polvo, velocidad, distribución y concentración de las partículas, propiedades químicas y físicas del material.
 - Propiedades físicas de los materiales involucrados: forma, propiedades conductivas de calor, propiedades ópticas.
 - Condiciones ambientales: flujo de gas de protección, temperatura de precalentamiento, tiempos de enfriamiento, tipos de atmosferas.
 - Parámetros relativos a la cinemática de la máquina: velocidad de avance, solapamientos entre diferentes trayectorias, aceleraciones, precisión, resolución y repetitividad del movimiento.
- Procesos físicos: son todos aquellos que se observan por la interacción de los parámetros de entrada. La energía aportada y los materiales interactúan dando lugar a fenómenos de absorción, reflexión, difusión y transmisión térmica. Existen a su vez fenómenos dinámicos de fluidos, tanto en el material fundido como en los diferentes flujos de gas y polvo que intervienen en el proceso. Dada las características del propio proceso, también existen fenómenos de solidificación rápida, que dan lugar a tensiones residuales de volumen y superficie.
- Parámetros de salida: debido a la cantidad de fenómenos físicos que ocurren durante el proceso, la evolución y tendencia de los parámetros de salida se establece de manera experimental en la mayor parte de los casos. Entre los parámetros más estudiados se pueden mencionar:
 - Características geométricas: ancho, alto y ángulo de contacto del cordón. Altura de la capa resultante del solapamiento de diferentes cordones. Dilución del material y zona afectada térmicamente por el haz láser.
 - Características físicas: microestructura, dureza, tensiones residuales, etc.

- Defectos: porosidad, agrietamientos, faltas de fusión, faltas o excesos de dilución o penetración, etc.

II.9.1. Relación de aspecto y dilución

Como se ha mencionado anteriormente, el análisis de los parámetros de salida permite establecer los parámetros de entrada que harán que el proceso se repita. De la misma manera se determinan los rangos en los que se pueden variar dichos parámetros para evitar defectos.

Analizando geoméricamente un cordón de aporte de material por DED-LB, se observan algunas dimensiones características. Estas dimensiones vienen señaladas en la Figura II.29, en la que se observa como el material de aporte queda adherido al sustrato. La porción de material aditivo que queda combinada con el material base por debajo de la superficie se denomina dilución. La porción que queda situada por encima de la superficie, cuya composición es habitualmente material aditivo en su totalidad, conforma la capa de material nuevo sobre la que se adherirán las capas sucesivas.

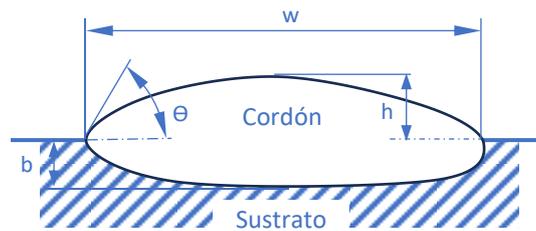


Figura II.29. Sección transversal de un cordón de proceso DED-LB

La dilución viene determinada por la ecuación (2.7), donde ρ_a y ρ_s son las densidades del material aportado y sustrato respectivamente, y X es el porcentaje en peso de cada componente dentro de la zona del cordón. Atendiendo a las dimensiones geométricas, la dilución puede definirse también como se muestra en la ecuación (2.8).

$$dilución = \frac{\rho_a(X_{s+a} - X_a)}{\rho_s(X_s - X_{s+a}) + \rho_a(X_{s+a} - X_a)} \quad (2.7)$$

$$dilución = \frac{b}{b + h} \quad (2.8)$$

II.9.2. Potencia por unidad de área

El ancho de un cordón se relaciona estrechamente con el diámetro del haz láser y su distribución de energía. Es de esperar que un crecimiento en el diámetro afecte una mayor área, sin embargo, es difícil alcanzar la temperatura de fusión de los metales en general, y por lo tanto es importante mantener una relación entre la potencia de láser empleada y el área de acción de la misma.

La potencia por unidad de área es una herramienta útil para definir proporcionalmente cuanta energía es necesaria para generar una zona de fusión en el material base. La ecuación (2.9) para un haz láser circular muestra que esta combinación de parámetros es independiente de la distribución de energía, a pesar de que el fenómeno al que afecta no lo sea.

$$\frac{\text{Potencia}}{\text{Área}} = \frac{4 \cdot P_l}{\pi \cdot d_l} \quad (2.9)$$

P_l es la potencia del haz láser, d_l es el diámetro del haz sobre el material base, normalmente en el plano focal del láser,

II.9.3. Densidad de energía

La combinación de parámetros de potencia por unidad de superficie es útil como aproximación para establecer la potencia necesaria en caso de variar el diámetro del haz láser, sin embargo, es insuficiente para definir el proceso, ya que no tiene en consideración la velocidad de avance del cabezal. El tiempo de interacción del haz con el material es importante ya que define la energía aportada.

En un proceso de onda continua, donde la potencia del haz láser es constante, con un haz circular, la densidad de energía viene dada por la ecuación (2.10). Donde P_l es la potencia del haz láser, d_l es el diámetro del haz sobre el material base, normalmente en el plano focal del láser, y f la velocidad de avance.

$$\frac{\text{Energía}}{\text{Área}} = \frac{P_l}{f \cdot d_l} \quad (2.10)$$

Se observa que la combinación de parámetros de la ecuación (2.10) establece la cantidad de energía que llega al sustrato. La potencia y la velocidad de avance son inversamente proporcionales y por lo tanto se ajustarán para mantener la energía suficiente para la fusión del material. Sin embargo, en este caso aún no se ha hablado de la influencia del material de aporte.

II.9.4. Caudal másico y concentración de polvo

La influencia de la cantidad de polvo en el proceso es clave para generar los cordones de aporte de material. La cantidad de polvo que se inyecta en la zona de fusión influye directamente en la altura de los cordones, pero a su vez puede atenuar la energía que alcanza el material base, ya que el polvo cruza al haz láser antes de alcanzar la zona de material fundido.

El caudal másico de material en polvo se expresa como la masa de polvo inyectado por unidad de tiempo. Sin embargo, es la concentración de polvo la que indica cuanto material de aporte interviene en el proceso.

$$\frac{\text{Polvo}}{\text{Área}} = \frac{\dot{Q}_p}{f \cdot d_l} \quad (2.11)$$

En la ecuación (2.11), \dot{Q}_p es el caudal másico de polvo, f la velocidad de avance del cabezal y d_l el diámetro del haz láser. Es importante aclarar que se debe tener en cuenta el diámetro del haz láser y no el diámetro del área que la boquilla de aporte genera con el polvo. El polvo interactúa con la zona de material fundido, y con el propio haz láser, y todo el polvo que cae fuera de esa área se pierde. Es decir, si el diámetro del punto focal de la boquilla es mayor que el de punto focal del haz láser, la eficiencia del uso del polvo decae considerablemente.

II.9.5. Combinatoria de parámetros

Como se ha visto, la combinación de la velocidad de avance, la potencia del haz láser y el caudal másico de polvo son los tres parámetros de entrada básicos que determinan las características del proceso. Cada uno de ellos, influye sobre la geometría del cordón en uno o más factores.

En las distintas combinaciones de parámetros que se han visto, el diámetro del haz láser es común para todas las ecuaciones (2.9, 2.10, 2.11) y por lo tanto puede simplificarse. Esto da lugar a expresiones lineales como son la densidad lineal de energía (energía por unidad de longitud) y concentración de polvo lineal (masa por unidad de longitud).

La altura del cordón de material aportado es consecuencia de la concentración de polvo lineal, así como, la penetración y la fusión del mismo lo es de la densidad de energía lineal. Si se aumenta el caudal de polvo, para una velocidad dada, aumenta la altura del cordón, pero sólo si la potencia es suficiente para fundir el material. El aumento de la velocidad hace que cualquiera de estos factores disminuya, pero también disminuye el tiempo de enfriamiento del cordón.

Los caudales de gas son necesarios para el correcto desarrollo del proceso, pero también influyen en las características de salida del mismo. La cantidad de gas adecuada protege el proceso de reacciones con los gases de la atmósfera y evita que las proyecciones de partículas fundidas recorran el camino inverso hacia las lentes del cabezal láser. Sin embargo, un exceso de gas puede suponer la aparición de poros si el tiempo de enfriamiento es muy rápido. Por esta razón existe también un parámetro de concentración lineal de gas (volumen de gas por unidad de longitud), cuya relación viene dada por el cociente entre el flujo de gas (volumen de gas por unidad de tiempo) y la velocidad de avance (longitud por unidad de tiempo).

II.10. Aplicación del proceso DED-LB en la industria aeronáutica en la actualidad

La fabricación aditiva ha incrementado su nicho en los últimos años y se ha extendido a diferentes áreas de la industria rápidamente, siendo el sector aeronáutico uno de ellos. Comparado con muchos otros sectores como el del automóvil, la producción de componentes aeronáuticos puede considerarse de serie corta y de alto valor añadido. La gran complejidad de las piezas, junto a las dificultades añadidas de trabajar con materiales como titanio, aluminio y superaleaciones, hacen que sea difícil realizar el salto a la producción de series más grandes. Sin embargo, esfuerzos dedicados a esta difícil tarea por parte de empresas del sector, como Airbus, Rolls-Royce y General Electric (GE) [Ålgårdh et al. 2017], han ido integrando las tecnologías aditivas cada vez más en los últimos años, y se espera que la tendencia continúe

En la actualidad, las tecnologías aditivas presentan aplicaciones aún limitadas en la fabricación aeronáutica. La mayoría de las piezas fabricadas con este tipo de proceso suelen ser, en general, estáticas y sometidas a pocos esfuerzos. Sin embargo, existe una apuesta firme por parte de las empresas especializadas del sector que marca una tendencia clara del incremento en el uso de estas tecnologías tanto para la fabricación como para las reparaciones, que se emplean para la recuperación de piezas de alto valor añadido [Ålgårdh et al. 2017].

Algunos ejemplos de piezas fabricadas con tecnología aditiva pueden encontrarse en el motor aeronáutico LEAP 1^a (*Leading Edge Aviation Propulsion*) de cuya producción en serie se encarga GE y que se encuentra operando en los Airbus A320 NEO. Gracias al uso de esta tecnología se ha conseguido la reducción del número de piezas, así como de su peso, y por lo tanto una reducción del consumo de combustible. Esta misma compañía ha fabricado y testeado motores ATP (*Advanced Turboprop*) con un 35% de su composición creada mediante tecnología aditiva.

Comac, en una colaboración con diversas universidades, ha creado un larguero de ala de 5 metros mediante tecnología aditiva. Esta pieza se utiliza en el Comac 919 y pretende ser de los primeros aviones comerciales que utilicen tecnología aditiva para piezas estructurales.

En el caso de los turbofán de la serie BR700 de Rolls-Royce, se emplean tecnologías de DED-LB para la creación de soportes, abrazaderas y bridas sobre su carcasa. La baja afectación térmica del proceso hace que pueda despreciarse las distorsiones de los componentes y el gas protector localizado garantiza el aporte de material sin oxidaciones.

Algunas piezas sufren desgaste durante su desempeño como suele suceder con los alabes de las turbinas. La erosión y otros tipos de daño directo deterioran generalmente el frente del alabe y este debe ser reparado. Los componentes de turbomáquinas son piezas de un alto valor añadido

cuya reparación supone grandes ventajas económicas, ya que evita su retirada tras la aparición de dichos defectos y elimina la necesidad de disponer de un almacén de repuestos excesivamente amplio [Boehm, 2016].

En cuanto a los materiales utilizados en la fabricación aditiva, ya se ha mencionado que existe un amplio rango en el que se incluyen aceros, aceros de herramienta, titanio, aluminio y superaleaciones de níquel. Los primeros tienen un menor impacto en el ámbito aeronáutico, mientras que el titanio y el aluminio son de gran importancia, debido a su baja densidad. Las superaleaciones de níquel son también apreciadas y necesarias en dicho sector, gracias a su alta resistencia térmica. Para el titanio y el aluminio el uso de la tecnología de DED-LB es menos frecuente debido a las posibles oxidaciones presentes durante el proceso. Sin embargo, existen centros en los que, aun así, se opta por dicho proceso en cámaras cerradas y completamente inertes, que ofrecen un ambiente libre de oxidaciones.

Algunos ejemplos de piezas reparadas por este tipo de tecnología junto a materiales empleados con la misma se citan en las tablas siguientes (Tabla I) [Kaser].

Tabla II.2. Componentes reparados por DED-LB y lista de algunos materiales empleados [Kaser].

Piezas reparadas por DED-LB		Lista de algunos de los materiales empleados para la reparación	
Turbomáquinas	Componente	Inconel 625	Rene 80
JT9D-7R4D/G	TB1	Inconel 713	Rene 142
JT9D-7R4G	TB2	Inconel 718	Nimonic 90
PW-4000	TB1/TB2	Inconel 738	GTD 111
PW-2037	TB1	Inconel X750	Stainless 410
V2500	TB1/TB2	Inconel 901	
F110	TB1	MAR M002	
F100	TB1	Hastelloy X	
CF6-80C2	Stage 1	Travelloy	
CF6-80^a	Stage 1	CM 64	
CF6-50	Stage 1	C263	
CF6-50 PIP	Stage 1	Titanium 6-4	
CF6-6	Stage 1	PWA 694	
CF6-6	Stage 2	PWA 795	
CFM56-2		PWA 1447	
CFM56-3		MAR M247	
CFM56-5		Stellite 694	
CF6-80C2	Stage 2	Waspalloy	
CF6-80^a	Stage 2	Haynes 188	

El DED-LB puede emplearse para fabricar estructuras metálicas en voladizo y de gran tamaño, gracias a sistemas multieje que permiten orientar el componente construido de modo que las

capas se construyan sin estar en voladizo. Un sistema DED de cinco ejes fabricado por *The Welding Institute (TWI)* se utiliza en la producción de una cámara de combustión de un motor de helicóptero en Inconel 718 con limitaciones de ángulo de voladizo cercanas a 90° [Najmon et al. 2019], [Hauser, 2014].

En [Xue et al. 2015] se demuestra la capacidad de producir componentes de impulsores y perfiles mediante el uso de procesos DED con altas prestaciones mecánicas en comparación con las técnicas de fabricación típicas. Ilustran la capacidad del DED para reparar álabes de turbina y una tobera de vórtice para combustible utilizando Inconel 718, que suele ser un material difícil de depositar utilizando procesos de soldadura típicos o procesos de deposición láser sin causar grietas [Xue et al. 2015].

Otros estudios han demostrado que la recuperación de componentes mediante FA tiene, en comparación con los métodos tradicionales, una huella medioambiental sustancialmente menor [Walachowicz et al. 2017]. Restaurar la integridad estructural de los rotores con palas integradas, también conocidos como *blisks*, resulta rentable, ya que la fabricación de estos componentes puede costar decenas o incluso cientos de miles de euros. El blisk T700, fabricado en acero AM355, sufre de erosión en su borde de ataque. Esto dio lugar a un estudio por parte de la empresa Optomec, que utilizó Stellite 21, un material a base de cobalto resistente a la erosión, para reparar el borde de ataque. El disco reparado superó las pruebas de giro y de fatiga de bajo ciclo y mostró cualidades metalúrgicas, de tracción y de erosión positivas que permitieron su certificación [Optomec, 2016].

En resumen, la FA no sólo sirve para la fabricación sino también reparación y recuperación de componentes [Najmon et al. 2019]. Algo que supone mejoras en la industria aeronáutica en particular, ya que no sólo supone un ahorro en el coste de los componentes nuevos, sino también en la necesidad de recambios disponibles, o en el cumplimiento de plazos de fabricación de piezas nuevas [Frazier, 2014].

II.11. Materiales altamente reactivos en la industria aeronáutica

La deposición por energía láser focalizada (DED-LB) ofrece la posibilidad de fabricar y reparar componentes de alto valor añadido para sectores como el aeronáutico o el médico. En estos sectores se emplean una amplia gama de materiales reactivos, entre los que destacan las aleaciones de titanio. Estos materiales suponen un reto para su fabricación mediante procesos de DED-LB, debido a la necesidad de una atmósfera protectora que minimice el riesgo de oxidación y garantice la calidad metalúrgica del material depositado.

Las aleaciones de titanio, como la Ti6Al4V, se emplean ampliamente en aplicaciones aeronáuticas debido a su relación entre resistencia y peso [Boyer, 1996]. Las aplicaciones más comunes de estas aleaciones de titanio son los componentes estructurales y las piezas de los motores aéreos [Singh et al. 2017]. Además, las aleaciones de titanio son biocompatibles [Cui et al. 2011] y presentan una alta resistencia a la corrosión, lo que las hace muy apropiadas para implantes médicos [Giannatsis y Dedoussis, 2009], aplicaciones marinas [Gorynin, 1999], y otros componentes de la industria química [Gurrappa, 2003].

En todas estas aplicaciones, la FA ha ganado una amplia aceptación en la producción de componentes complejos y de alto valor añadido [Uhlmann et al. 2015]. Sin embargo, el Ti6Al4V sigue siendo un material que presenta grandes dificultades cuando se emplea en procesos de fabricación aditiva, debido a su baja conductividad térmica, endurecimiento por deformación, y su alta reactividad química con el oxígeno a altas temperaturas [Liu y Shin, 2019]. Esta última característica ha sido analizada previamente en la literatura y se ha establecido que, cuando se calientan por encima de 700 K, las aleaciones de titanio necesitan estar bajo una atmósfera protectora para evitar la oxidación [Donachie, 2000]. La exposición al oxígeno por encima de esa temperatura compromete la composición química [Azarniya et al. 2019] y, en consecuencia, las propiedades mecánicas del componente [Liu y Shin, 2019].

Existen tres mecanismos subyacentes que se ven favorecidos por el aumento de oxígeno en el titanio, y que son responsables de la pérdida de ductilidad. El primero es la precipitación de las fases α aciculares en la fase β . El segundo es la precipitación de los cúmulos a nanoescala la fase α_2 en la matriz α . Y, por último, la estabilización de las estructuras por capas α - β - α entre los granos α [Yan et al. 2014]. El titanio presenta una gran solubilidad de oxígeno en las fases α (HCP, *hexagonal close-packed*) y β (BCC, *body-centered cubic*) y, por tanto, cabe suponer que el material en bruto contiene una cantidad no despreciable de oxígeno [Lindwall et al. 2018]. Así pues, en el caso de la FA de aleaciones de titanio, es esencial realizar un seguimiento del contenido de oxígeno [Hua et al. 2009] incluso en la materia prima virgen en polvo, de modo

que pueda detectarse la posible absorción de oxígeno durante su manipulación o fabricación. Además, es necesario limitar el número de ciclos de reutilización del polvo, ya que el contenido de oxígeno aumenta con cada etapa de reciclado [Arrizubieta et al. 2020]. En lo que respecta al deterioro de las propiedades mecánicas, la tolerancia al oxígeno depende de la microestructura [Lindwall et al. 2018]; pero como regla general, los niveles de oxígeno superiores al 0,33 % en peso reducen significativamente la ductilidad de la aleación Ti6Al4V.

Los procesos de FA basados en láseres implican altas temperaturas, por lo que es necesario generar una atmósfera protectora que garantice que el nivel de oxígeno se mantiene por debajo de un valor límite. Para ello, y debido a su naturaleza inerte y a su mayor densidad en comparación con el aire, el argón es el gas más utilizado. Dependiendo del proceso de FA y de su configuración, existen varias estrategias diferentes para generar una atmósfera protectora. Los sistemas fusión de lecho de polvo (PBF-LB) han implementado, en su gran mayoría, cámaras cerradas con atmósferas inertes llenas de argón hasta que el nivel de oxígeno desciende a valores de entre 5 y 10 ppm [Liu y Shin, 2019]. Esta configuración cerrada se convierte en una restricción en términos de dimensiones de la pieza de trabajo. Además, en estos casos, es necesario rellenar la cámara de protección en cada ciclo de fabricación, con el correspondiente aumento de tiempo y costes. En su lugar, surge una idea alternativa y económicamente atractiva, que consiste en proteger únicamente la zona de trabajo en lugar de toda la cámara de construcción, aumentando así la productividad del proceso y reduciendo el consumo de argón [Carlota, 2019], aunque la creación de dicha atmósfera local se convierte en un reto en estos procesos de FA.

Por otro lado, los procesos de DED-LB inyectan argón directamente en la zona de trabajo para crear una atmósfera inerte local. Esta configuración ofrece la posibilidad de trabajar con piezas más grandes o incluso de reparar zonas localizadas en los componentes complejos de alto valor añadido [Saboori et al. 2017]. Además, el proceso ofrece la oportunidad de fabricar componentes con materiales funcionalmente gradados, multimateriales o materiales compuestos reforzados, cambiando fácilmente el material de partida durante la fabricación [Hofmann et al. 2014].

En los últimos años se han presentado avances en la tecnología DED-LB para la deposición de materiales altamente reactivos. Sahasrabudhe y Bandyopadhyay utilizaron un ambiente controlado encerrado en una cabina para la fabricación de materiales reactivos por tecnología LENS [Sahasrabudhe y Bandyopadhyay, 2016]. En la misma línea, Das et al. utilizaron la tecnología LENS para la fabricación *in situ* de materiales compuestos de matriz de titanio (TMC)

reforzados con partículas discontinuas sintetizadas [Das et al. 2012], [Das et al. 2014]. Traxel y Bandyopadhyay estudiaron la FA de titanio en combinación con partículas de circonio (Zr) y nitruro de boro (BN) para crear microestructuras reforzadas por fases, también *in situ* [Traxel y Bandyopadhyay, 2018]. No obstante, en todos los casos, los recubrimientos se fabricaron dentro de una cámara cerrada instalada en el interior de una máquina para limitar la oxidación de la aleación durante el proceso.

El diseño de las boquillas de DED-LB para la inyección de polvo, normalmente implica dos corrientes de gas: el gas portador, que arrastra las partículas de polvo, y el gas de protección que crea una atmósfera protectora local [Zhang et al. 2018]. A continuación, el material de alimentación se inyecta a través de la boquilla directamente en el baño de fusión generado por el láser [Ruiz et al. 2018]. Un aumento del flujo de gas de protección reduce la cantidad de oxígeno cerca del área de deposición y mejora la disipación convectiva del calor. Por lo tanto, asegura un enfriamiento más rápido del material depositado, ayudando a reducir la oxidación [Liu y Shin, 2019]. En esta línea, Yu et al. estudiaron la influencia de aumentar el flujo de gas de protección en combinación con menores potencias de láser [Yu et al. 2012]. Se midió un contenido de oxígeno del 0,13 % en peso en la pieza depositada, pero no se midió el nivel de oxígeno en la atmósfera durante el proceso de aporte. Además, ninguno de los trabajos anteriores estudió la distribución de la atmósfera protectora a la salida de la boquilla, ni analizó una configuración de boquilla no simétrica.

Como solución híbrida entre una cámara inerte y una atmósfera protectora local, Tapoglou et al. introdujeron un contenedor y una bolsa de polietileno en una máquina DMG Mori Lasertec 65 3D *Hybrid* para obtener una atmósfera protectora mejorada [Tapoglou et al. 2020]. Se alcanzó una concentración de oxígeno de 100 ppm en la zona de deposición. Sin embargo, al aplicar este método, el proceso DED pierde su capacidad de forma libre, ya que el área de deposición se limita de nuevo al tamaño del contenedor.

II.12. Uso de gases inertes en los procesos de DED-LB con inyección de polvo

El proceso de DED-LB con inyección de polvo se ha descrito en detalle anteriormente en este capítulo, y se han señalado algunas de sus características más importantes. Entre ellas se aclara que todo el proceso se lleva a cabo empleando dos flujos de gas diferentes: un gas de protección, cuya función es la generación de una atmósfera protectora para que se eviten las reacciones, y un gas portador que se utiliza para transportar el polvo a través de todo el circuito y la boquilla hasta la zona de fusión. La utilización de estos dos flujos de gas diferentes tiene consecuencias directas en el proceso. En primer lugar, al igual que en otros procesos de soldadura, el gas de protección es necesario para proteger el material depositado de la oxidación [Cortina et al. 2018]. Representa el mayor flujo de gas utilizado, y tiene un impacto directo en la calidad del material depositado. Uno de sus efectos negativos principales es la generación de poros en el material aportado, pero este fenómeno puede intentar evitarse con la modificación de otros parámetros del proceso [Li et al. 2015], [Jyothish y Prof. Krishnadas, 2017]. En segundo lugar, el gas portador arrastra el polvo desde el alimentador hasta la boquilla y el baño de fusión. Este flujo de gas acelera e inyecta las partículas de polvo a la salida de la boquilla. La interacción de ambos gases, portador y protector, con el polvo y la atmósfera determinan la distribución del polvo en el punto focal de la boquilla. Esta distribución del polvo es un factor clave en la eficiencia del proceso DED-LB [Gasser, 2011 (2)], [Arrizubieta et al. 2014]. La bibliografía de los procesos DED-LB sitúa al argón como el gas más común (tanto para gas protector como de arrastre), seguido del nitrógeno. Esto se debe a que el nitrógeno reacciona en menor medida y es más económico que el argón, pero no siempre protege el proceso de las reacciones químicas, ya que este gas reacciona con el Ti, el Nb y el V [Elmer et al. 2015].

Es común ver en los diferentes ámbitos industriales en los que el proceso de DED-LB se está desarrollando, el empleo de diferentes aleaciones de acero, superaleaciones de níquel [Petrat et al. 2016], [Benn y Salva, 2010] y aleaciones de titanio. Los aceros suelen alearse con vanadio, las superaleaciones de níquel, como Inconel 718 o Inconel 625, tienen titanio y niobio en su composición química y una de las aleaciones de titanio más típicas es Ti6Al4V, contiene tanto titanio como vanadio. Por lo tanto, en estos casos no debería emplearse el nitrógeno como gas de protección o de arrastre en el proceso DED-LB.

Existen muchas similitudes entre los procesos DED-LB y la soldadura por haz láser en cuanto a los gases de protección. De hecho, ambos utilizan la misma fuente de calor y los materiales deben protegerse de las mismas reacciones químicas con un gas inerte. Diferentes trabajos de investigación realizados en el campo de la soldadura por haz láser afirman que el uso de argón

con altas densidades de energía puede conducir a la formación de plasma debido a la menor energía de ionización del argón en comparación con otros gases, como el helio [Patschgera et al. 2011]. Esta formación de plasma crea un bloqueo del haz láser [Wester, 2011], reduciendo así la energía que finalmente llega a la pieza. Se ha observado que, utilizando una mezcla de argón y helio durante el proceso, la profundidad de las soldaduras es comparable a las que se consiguen con un flujo de argón puro. Aunque, por otro lado, el ancho de la soldadura es mayor cuando se utiliza esta mezcla argón y helio [Patschgera et al. 2011].

Como se ha mencionado anteriormente, para el proceso de DED-LB se suele emplear argón y no nitrógeno. Otra muestra de esta realidad es el hecho de que los fabricantes de máquinas herramienta que trabajan con dicho estos procesos, como puedan ser: DMG MORI (Bielefeld, Alemania), Trumpf (TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen, Alemania), o MAZAK (Yamazaki Mazak Corporation, Oguchi, Japón), entre otros, suelen recomendar el uso de argón a pesar de su elevado precio. Sin embargo, algunas de estas empresas punteras han comenzado a utilizar helio, en el proceso, como gas portador, manteniendo aún al argón como gas de protección. Esto se debe a una cuestión física, derivada de la dinámica de fluidos. La densidad del helio es menor que la del argón, por lo que cuando el flujo de helio se cruza con el de argón, se reducen las turbulencias y se consigue un flujo de gas más estable en el sustrato. Este fenómeno contribuye a mejorar la concentración de polvo y de gas protector en la zona de fusión, lo que simplifica el diseño de las boquillas.

Por lo tanto, es necesario conocer cómo el uso de diferentes gases puede afectar al proceso DED-LB. De la revisión bibliográfica se desprende que se han realizado algunas investigaciones centradas en el uso de argón o nitrógeno individualmente, siendo el caso del argón el más documentado. Sin embargo, existe una falta información sobre la influencia que el helio o las mezclas de gases pueden tener en el proceso de DED-LB.

II.13. Digitalización 3D de componentes y detección automática de defectos

En términos generales, la geometría de un componente es conocida desde su diseño. Sin embargo, para realizar una reparación es necesario contar con la información sobre los defectos generados sobre la pieza o componente. La adquisición de la geometría real de un componente es un proceso que lleva desarrollándose desde hace tiempo, y en las que las nuevas tecnologías de escaneo 3D están consiguiendo resultados cada vez más fiables. La digitalización de componentes en modelos 3D no sólo sirve para la reparación de un defecto, sino también para la verificación posterior y su comparación con el modelo de diseño.

La digitalización 3D de un componente responde a una doble finalidad. Por un lado, se digitaliza el componente para su comparación con su modelo de diseño, y de esta forma se detectan imperfecciones derivadas de la fabricación. Mientras que, por otro lado, se recurre a la tecnología de digitalización 3D para la detección de defectos por rotura o desgaste y que son susceptibles de ser reparados. En ambos casos, el proceso de digitalización 3D consta de dos fases. La primera consiste en la adquisición de datos, y la segunda fase de tratamiento o procesado de los mismos de forma que den lugar a un fichero en formato de diseño.

La digitalización 3D se realiza a través de diferentes tecnologías de adquisición de puntos. La idea tras estas tecnologías es conseguir una nube de puntos virtual que representen la geometría real de la manera más precisa posible. En la industria, existen diferentes tecnologías para la adquisición de puntos, entre las que destacan los métodos de contacto y los métodos ópticos. Existen incluso algunos equipamientos combinan ambas tecnologías para aportar mayor versatilidad al usuario. Dentro de los métodos de adquisición por contacto, destacan las denominadas máquinas de medición por coordenadas (MMC) (Figura II.30). Esta tecnología emplea palpadores que al contactar con la pieza adquieren las coordenadas de la posición de dicho contacto y la archivan para ir generando la nube de puntos que componen la geometría. Los palpadores tienen la opción de contactar de manera discreta, distintos puntos característicos de una geometría, o de realizar un contacto continuo para generar una forma concreta. En ambos casos se tratan de equipos de gran precisión [Puertas et al. 2013], aunque con ciertas limitaciones. En muchas situaciones la propia geometría de la pieza impide que el palpador acceda a ciertas zonas. Mientras que, al tratarse de mediciones por contacto, no son susceptibles de ser utilizados con materiales blandos o piezas fácilmente deformables.



Figura II.30. Máquina de medición por coordenadas, Mitutoyo Crystal Apex V.

Por otro lado, los sistemas ópticos (Figura II.31) basan su funcionamiento en la proyección de luz láser, que incide sobre la superficie y es captada nuevamente por sensores que digitalizan la posición basada en la reflexión. Al ser una captación de datos sin contacto, su velocidad es mayor comparada con la que puede verse en las MMC, por ejemplo. Sin embargo, presentan limitaciones en cuanto a los materiales o las superficies que son capaces de escanear. Aquellos materiales que permiten el paso de la luz dificultan enormemente el uso de este tipo de tecnologías, y para solucionarlo hace falta a pinturas que opaquen la superficie. La propia geometría también es un factor a tener en cuenta, ya que la propia forma del componente puede incluir zonas en las que no acceda la luz, como pueden ser cavidades profundas a través de plano inclinados.



Figura II.31. Sistemas ópticos. Leica Absolute Tracker AT500 (izquierda) y ATOS Triple Scan (derecha).

Por último, pero no menos importante, es la capacidad dimensional del dispositivo de digitalización. Como se ha explicado, las MMC son equipos de gran precisión que, sin embargo, disponen de un volumen determinado. La pieza que se desea digitalizar no sólo debe caber dentro de la propia máquina, sino que también debe ser viable su traslado hasta la misma. En los casos de captación óptica, esta problemática en la logística suele sortearse con equipos portátiles, aunque por norma general suelen carecer de la misma precisión que los equipos fijos. Aunque, en los últimos años se ha hecho cada vez más frecuente la presencia de estos equipos portátiles, tanto de contacto como ópticos, en el mercado (Figura II.32).

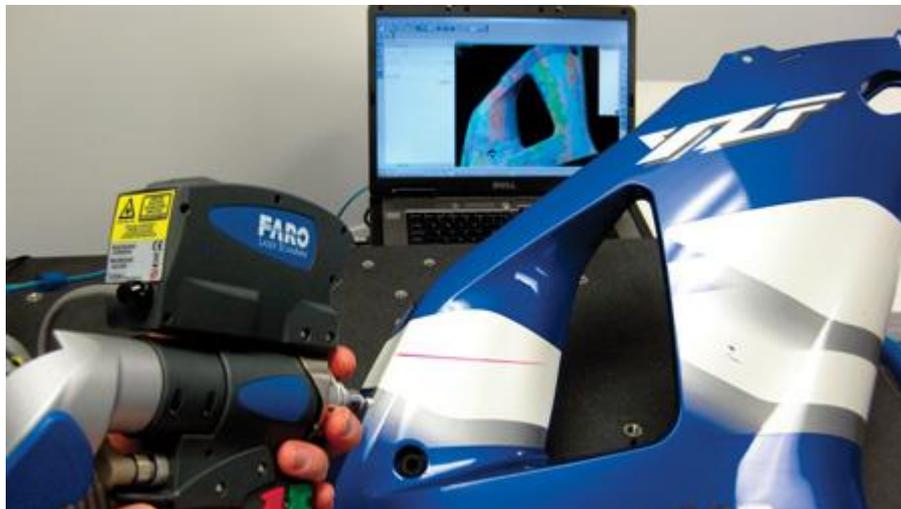


Figura II.32. Sistema de digitalización 3D portátil.

II.14. Estrategias CAM para fabricación o reparación mediante DED-LB

La fabricación aditiva abre la puerta a la creación de piezas o componentes de geometrías más creativas, eficientes y complejas, quitando algunas de las barreras frecuentes en la fabricación convencional de arranque de viruta o conformado. Sin embargo, aunque las capacidades de la tecnología sean tales, no significa que el desarrollo de la misma este a la altura de sus capacidades. Esto es justamente lo que ocurre en el desarrollo de softwares de programación de trayectorias para los procesos de DED-LB.

Los años de desarrollo en programas de CAD/CAM/CAE para los métodos de fabricación convencionales, y más concretamente para los de arranque de viruta, han llevado a la casi automatización de las operaciones de fabricación, minimizando el tiempo de programación y aumentando la eficiencia de las propias máquinas de mecanizado

Sin embargo, esto no ocurre en el caso de la fabricación aditiva, y mucho menos en los procesos de DED-LB, donde el desarrollo de estos programas aún se tropieza con el propio desarrollo de la tecnología. La velocidad del cambio en las estrategias de aporte, y la cantidad de variables en los parámetros de proceso, dificultan la creación de herramientas que automaticen la programación de las trayectorias al mismo nivel que existen en los procesos de mecanizado convencional. La necesidad de este tipo de programas ha ido creciendo con el tiempo en la industria [Toyserkani et al. 2004], fruto de una demanda cada vez mayor de las tecnologías aditivas en los diferentes sectores. Sin embargo, esta demanda encuentra numerosas complicaciones para ser cubierta. A las tecnologías aditivas hay que sumarles, además de su complejidad y desarrollo, el lento trabajo de estandarización que sufren los procesos durante su evolución [Thompson et al. 2016].

Numerosos avances han sido presentados por los diferentes desarrolladores de software, entre ellos se encuentra la compañía alemana AIX-Path (GmbH) que ha desarrollado un módulo para virtualizar el proceso de DED-LB en la reparación de turbinas de gas. Dicho módulo genera estrategias de aporte y una estimación de la geometría final de la pieza [AixPath]. Por otro lado, la compañía Siemens presentó en la EMO de Milán, en 2015, el desarrollo de un módulo para dar cobertura a las necesidades de la fabricación aditiva dentro de su software NX. Un avance surdido de su colaboración con DMG/MORI para la máquina de mecanizado híbrido Lasertec 65D [NX, Siemens].

La estructura de un software CAM orientado a la fabricación aditiva se puede dividir en dos funciones independientes, que se relacionan entre sí para ofrecer una solución al proceso. Por

una parte, se deben crear los algoritmos necesarios para las distintas estrategias de aporte, que generen las trayectorias según se defina la herramienta (boquilla en el caso de DED-LB) y la operación que se desea realizar. La suma de estos algoritmos con capacidad de verificación de los movimientos de la herramienta respecto a la pieza se denomina *Backplot*.

Por otra parte, se requiere también una función para la verificación de colisiones y movimientos de los distintos componentes de máquina, a la que se denomina *Machine simulation* [Hedrick et al. 2015].

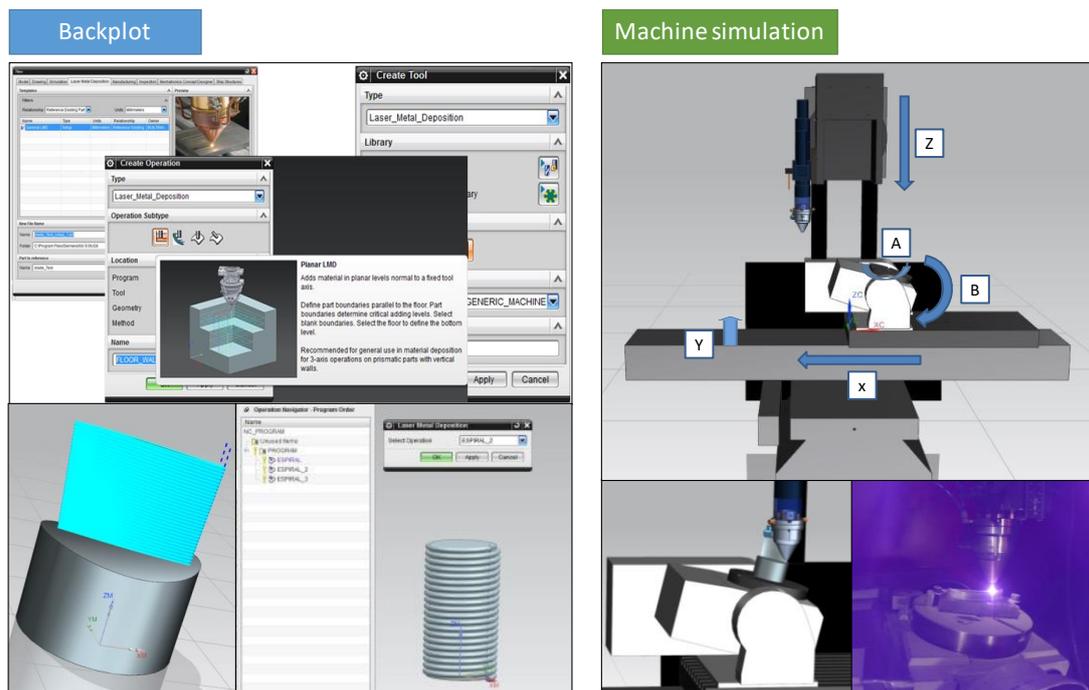


Figura II.33. Desarrollo de API para CAM de DED-LB [18]

La Figura II.33 muestra una solución desarrollo propio, por González et al [González et al. 2017], que busca cubrir la necesidad de un software CAM para el aporte de material mediante DED-LB. La solución pretende dar cobertura a las dos funciones citadas anteriormente, ofreciendo la opción de definir las estrategias de aporte más adecuadas para cada geometría, tanto para 3 ejes como para 5 ejes manteniendo así el haz láser perpendicular a la superficie de aporte [Calleja et al. 2014].

CAPÍTULO III. Equipamiento de laboratorio

CAPÍTULO III. Equipamiento de laboratorio.

Todos los ensayos que se describen en este documento se realizaron en una célula de procesado láser, reconstruida a partir de un centro de fresado convencional. Esta célula dispone de 3 ejes lineales que se complementan con otros 2 ejes rotativos para un total de 5 ejes cinemáticos. El volumen de trabajo es de $700 \times 360 \times 380 \text{ mm}^3$.

El sistema láser se compone de una fuente láser de fibra Nd:YAG con 1 kW de potencia máxima, 1.070 nm de longitud de onda y un BPP inferior a 0,4. Se utiliza una fibra óptica multimodo de 100 μm de diámetro para guiar el haz láser hasta la célula de procesamiento, donde el conjunto de colimación y lente de enfoque generan un haz láser de 1,6 mm de diámetro a una distancia focal de 200 mm.

Se dispone de dos alimentadores de polvo diferentes. Uno de ellos, es un alimentador volumétrico rotativo de disco Twin 10-C (Sulzer Metco), que puede emplear argón, nitrógeno, helio y otros gases como gas portador. Las dos tolvas que equipa dicho alimentador disponen de un sistema calefactable que elimina la humedad presente en el polvo. El otro alimentador de polvo es alimentador gravimétrico de lecho fluidizado, 9MP-CL (Oerlikon Metco). Dispone de una única tolva y no permite el calentamiento de la misma. Viene equipado con una célula de carga que trabaja en lazo cerrado para el control del caudal másico. Este alimentador dispone de dos entradas de gases calibradas para argón y nitrógeno solamente.

El cabezal de aporte es una boquilla coaxial continua de desarrollo propio, denominada como EHU-COAX2015, creada por el Grupo de Investigación de Fabricación de Alto Rendimiento del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) [Arrizubieta, 2017]. Su distancia focal desde la salida es de unos 15 mm aproximadamente y dispone de refrigeración interna por agua, que permite emplearla durante procesos de larga duración.

El caudal másico de polvo se monitoriza a través de unos sensores *Flow Watch* (Medicoat), que permiten garantizar un régimen de flujo estable. Aunque los sensores cuentan con indicaciones lumínicas sobre la estabilidad, su salida digital se conecta al control CNC del centro de mecanizado y se recogen sus datos durante todo el proceso.

Otro elemento de monitorización incorporado a la célula láser es un pirómetro digital de dos longitudes de onda IGAR 12-LO (LumaSense Technologies). La lectura del pirómetro es guiada por fibra óptica y su objetivo se halla instalado de manera coaxial al haz láser. Empleando un conjunto de lentes dicróicas y filtros se evita que las reflexiones del láser alcancen el objetivo del pirómetro, asegurando una lectura estable (Figura III.1). Se emplean este tipo de pirómetros,

en lugar de los convencionales de una sola longitud de onda, debido a su independencia de la emisividad del material en un amplio rango de temperatura y que no se ven afectados por la presencia de humos o polvo. Los valores mínimo y máximo de temperatura que registra este modelo de pirómetro son, 550 °C y 2.500 °C, respectivamente.

El factor k (también conocido como coeficiente de emisividad) del pirómetro de dos longitudes de onda se calibra con un sustrato de las mismas dimensiones y características que los empleados posteriormente en el resto de los ensayos. Se calienta el sustrato en un horno (Helmut ROHDE) lo máximo que permita el material y se emplea el pirómetro para comparar la medición, con la obtenida por un termopar tipo K. El factor del coeficiente de emisividad se corrige indicando al pirómetro la temperatura obtenida en el termopar.

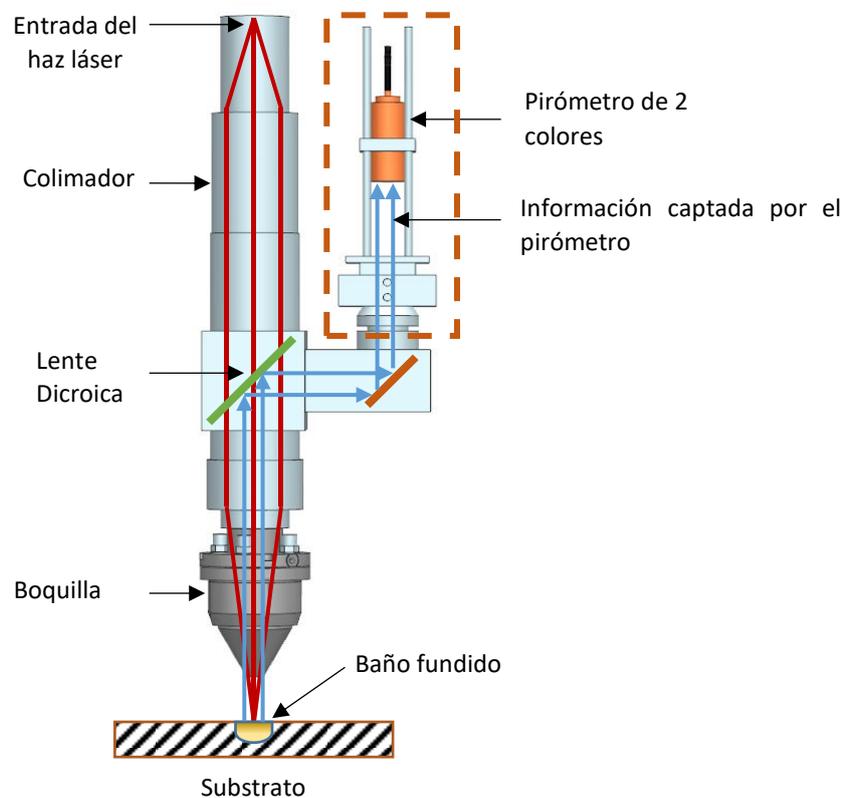


Figura III.1. Esquema del cabezal de aporte de DED-LB y el pirómetro para medir temperatura de manera coaxial.

Los gases que se utilizan durante las pruebas experimentales son:

- Argón (Ar) con pureza del 99,998 %
- Mezcla de argón y helio (Ar+He25): Ar al 75 % y He al 25 %
- Mezcla de argón y helio (Ar+He50): Ar al 50 % y He al 50 %

Cualquier mención a estas mezclas se hará, ya sea indicando sus porcentajes o simplemente empleando el termino entre paréntesis.

Los ensayos se realizan utilizando polvo metálico como material de aporte. Se emplean dos tipos de materiales principalmente. Por una parte, una aleación de Inconel 718 y por otra, una aleación de titanio, Ti6Al4V. Las composiciones químicas de cada uno de estos materiales, así como sus distribuciones de tamaños de partículas se presentan en las Tabla III.1 a Tabla III.4. En ambos casos las partículas de polvo tienen forma esférica y son producidas por atomización en atmósfera de argón.

Tabla III.1. Composición química (% en peso) del polvo de Inconel 718.

Cr	Mo	Nb	Fe	Ti	Si	Mn	C	B	Ni
19,00	3,00	5,00	18,00	1,00	0,20	0,08	0,05	0,005	BAL

Tabla III.2. Distribución del tamaño de las partículas (DTP) de polvo de la aleación Inconel 718.

DTP	D10	D50	D90
Tamaño de partícula [µm]	50	90	135

Tabla III.3. Composición química (% en peso) del polvo de titanio Ti6Al4V.

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
6.4	3.9	0.22	0.07	0.01	0.009	0.001	Bal

Tabla III.4. Distribución del tamaño de las partículas (DTP) de polvo de la aleación Ti6Al4V.

DTP	D10	D50	D90
Tamaño de partícula [µm]	45	75	106

Los sustratos empleados en los ensayos pertenecen los mismos tipos de aleaciones de los materiales de aporte. Para ambos casos se utilizan palanquillas de sección rectangular de 50 x 70 mm y cuyas composiciones químicas difieren muy poco de las presentes en los materiales en polvo (Tabla III.5 y Tabla III.6).

Tabla III.5. Composición química (% en peso) del Inconel 718, como material base en forma de palanquilla.

Ni	Cr	Nb + Ta	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Mn
52,50	18,40	5,08	5,08	3,04	1,03	0,54	0,33	0,24
Si	C	Cu	B	Ta	P	S	Fe	
0,11	0,052	0,05	0,005	<0,05	0,006	<0,002	BAL	

Tabla III.6. Composición química (% en peso) del Ti6Al4V, como material base en forma de palanquilla.

Al	V	Fe	O	C	N	Y	Ti
6,46 – 6,53	4,00 – 4,04	0,18	0,17 – 0,19	0,02	<0,01	<0,0009	BAL

CAPÍTULO IV. Desarrollo de una solución para el aporte de
materiales de alta reactividad en el proceso de DED-LB

CAPÍTULO IV. Desarrollo de una solución para el aporte de materiales de alta reactividad en el proceso de DED-LB.

En el presente capítulo se presenta el diseño y la fabricación de un módulo que se acople a una boquilla de aporte para DED-LB. La finalidad de este módulo es dotar a la boquilla en cuestión de la posibilidad de procesar estos materiales altamente reactivos y por lo tanto aumentar el abanico de posibilidades dentro de la tecnología DED-LB. A su vez, se busca una mejora en la eficiencia de la boquilla convencional, aumentando la concentración de polvo en la posición del plano focal del láser. Este módulo de protección adicional proporciona un flujo de gas inerte auxiliar y ofrece una solución mucho más flexible que las cámaras cerradas, eliminando así la necesidad de generar vacío y dirimiendo las limitaciones dimensionales.

IV.1. Diseño y requisitos del proceso

Se propone estudiar una metodología que permita diseñar y evaluar un módulo de gas auxiliar, accesorio a una boquilla de DED-LB ya existente, que permita el empleo de materiales altamente reactivos en el proceso de aporte. Para ello se toma como partida una boquilla ya estudiada y diseñada en el propio Grupo de Investigación de Fabricación de Alto Rendimiento del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), denominada EHU-COAX2015 [Arrizubieta, 2017].

El diseño y evaluación del módulo de gas auxiliar planteado en la introducción, se lleva a cabo mediante herramientas tipo CAD (*Computer-aided Design*) y CFD (*Computational Fluid Dynamics*), y se desarrolla atendiendo a una serie de requisitos. En la Figura IV.1 se representa el esquema de una posible solución.

En primer lugar, se busca que el módulo de protección adicional tenga un volumen lo más reducido posible, para permitir y mantener la buena accesibilidad de la boquilla original a zonas interiores y cavidades. De la misma manera, se propone que el módulo tenga una salida continua y concéntrica al cono exterior de la EHU-COAX2015 para mantener la misma configuración de boquilla (coaxial y continua), y que su montaje afecte lo menos posible al funcionamiento convencional de la misma.

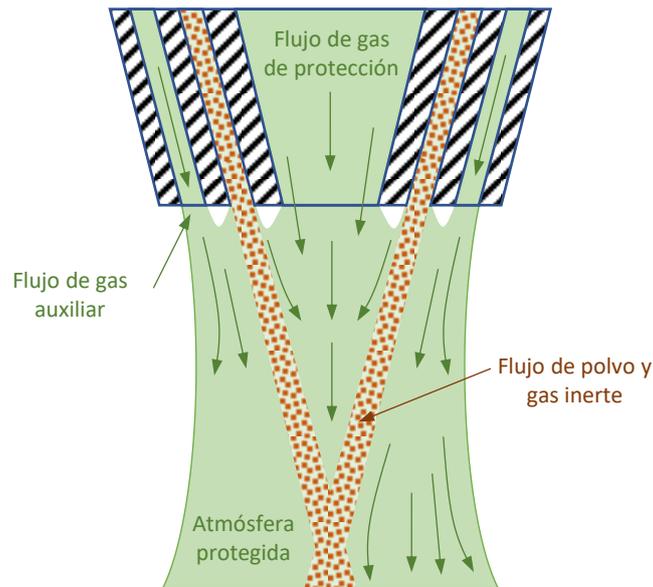


Figura IV.1. Esquema de boquilla coaxial continua con módulo de gas auxiliar.

En cuanto al consumo, se deben tener en cuenta dos consideraciones. Por un lado, el caudal de gas necesario para generar la atmósfera protectora debe mantenerse lo más bajo posible, ya que se trata de intentar minimizar el consumo. Por otra parte, también se desea un mayor rendimiento másico de la boquilla.

El tamaño del baño de fusión puede variar en función de los parámetros del proceso y de los materiales utilizados. Sin embargo, el láser empleado para las validaciones de experimentos dispone de una potencia máxima de 1 kW y en todos los casos la zona de fusión generada tiene un diámetro inferior a 2 mm, por lo que se analiza la concentración de oxígeno en esta región para evaluar el diseño adecuado de la boquilla.

Atendiendo a la necesidad de mantener la boquilla a baja temperatura para evitar la adherencia de partículas dispersas a su superficie o, en casos más críticos, evitar incluso la fusión de algunas de sus paredes delgadas internas, se proponen como materiales de fabricación aquellos que presenten mayor reflectividad para la longitud de onda del láser. En el caso de los láseres de fibra, con longitudes de onda cercanas a los 1.060 nm, los materiales como el aluminio, el cobre, o el bronce presentan una reflectancia superior al 95%, y por lo tanto resultan adecuados.

IV.2. Alternativas estudiadas

El diseño propuesto para el módulo de gas auxiliar se muestra en la Figura IV.2. En ella se observa el ensamblaje resultante de la boquilla EHU-COAX2015 preexistente y el módulo protector desarrollado. El circuito de gas de este nuevo módulo es independiente de los otros dos circuitos (protección y arrastre) presentes en la boquilla de DED-LB, lo que permite instalar y desinstalar este componente accesorio sin cambiar la configuración de la boquilla base.

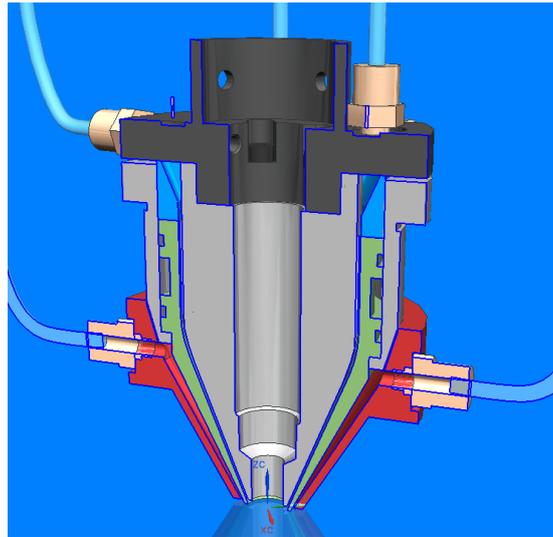


Figura IV.2. Diseño CAD del módulo de gas auxiliar unido a boquilla de DED-LB EHU-COAX2015.

El diseño preliminar ofrece una serie de alternativas, y es necesario determinar algunas de sus dimensiones características. En la búsqueda de reducir el tamaño del módulo, se emplea la cara exterior de la boquilla base como una parte activa del diseño. Para la generación del flujo de gas que circula por el interior del módulo de gas auxiliar, se emplea el espacio entre el módulo desarrollado y el cono exterior de la EHU-Coax2015. Se han estudiado tres alternativas que modifican la separación entre ambas caras, del módulo y la boquilla, y cuyas distancias son 0,5, 1 y 1,5 mm. En la Figura IV.3 y

Tabla IV.1 se muestra un esquema de la distancia entre caras mencionada y el caudal de gas necesario para cada valor de separación con el fin de obtener una velocidad de gas de 3 ms^{-1} .

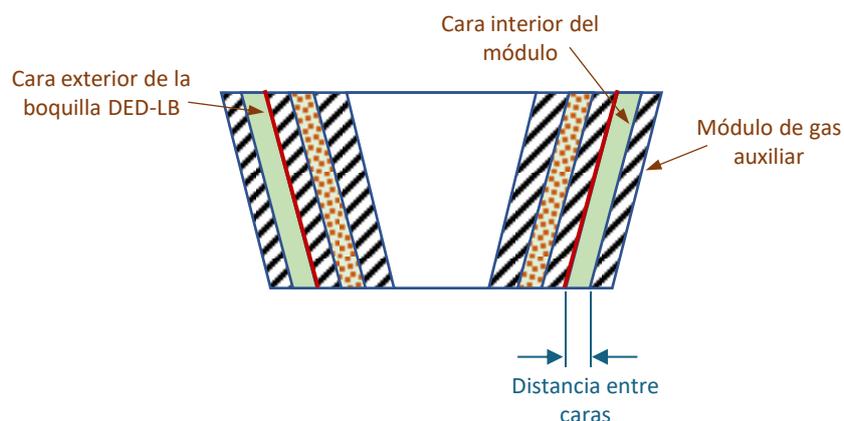


Figura IV.3. Esquema de la sección de la salida de una boquilla de DED-LB con el módulo de gas auxiliar.

Tabla IV.1. Tabla de distancias entre caras de diseño y flujos de gas correspondientes.

Distancia entre caras [mm]	Flujo de gas necesario [l·min ⁻¹]
0,5	3,8
1,0	7,9
1,5	12,3

A la vista de estos resultados, se descarta inicialmente el empleo de una separación de 1,5 mm por suponer un consumo de gas demasiado elevado. Así pues, el estudio se ha centrado en los otros dos valores de distancia de separación restantes, 0,5 y 1 mm. Para ello, se han realizado simulaciones en las que se ha calculado la concentración de gas protector y de polvo a la salida de la boquilla en cada caso.

IV.3. Modelo CFD para las simulaciones

El modelo CFD se desarrolla con la herramienta de simulación Fluent de Ansys [ANSYS], que ofrece la posibilidad de estudiar el comportamiento de diferentes gases fluyendo simultáneamente, así como las trayectorias seguidas por partículas discretas de polvo arrastradas por el gas.

Debido a la compleja interacción entre las distintas corrientes de gas y las partículas de polvo metálico dentro y a la salida de la boquilla de DED-LB, el modelo de simulación mediante CFD, debe asumir ciertas simplificaciones físicas [Arrizubieta, 2017].

Para minimizar el coste computacional se realiza el mallado del fluido que recorre la boquilla y el módulo de gas auxiliar, pero no el relativo al cuerpo sólido de estos componentes. También se genera un volumen de control que modeliza el comportamiento de la atmósfera circundante a la salida de la boquilla de aporte (Figura IV.4.(a)).

Para mejorar la convergencia en los cálculos matemáticos derivados de la simulación CFD del modelo, se siguen las propias recomendaciones del software Fluent. Por lo tanto, se establece un valor máximo de oblicuidad (*o skewness*) de 0,9 en el control de calidad del mallado (Figura IV.4.(b)).

Las partículas de polvo se definen como de forma esférica y se establece que el diámetro variable de dichas partículas sigue una distribución tipo Rosin-Rammler, típica en los materiales de FA en polvo [Liu et al. 2015] [Ni et al. 2020]. Las partículas se inyectan desde las cuatro superficies correspondientes a las entradas de gas portador con un flujo másico determinado en cada caso, (Figura IV.4.(a)). Tanto la velocidad de las partículas como la del gas se consideran iguales en dichos puntos. Las entradas de gas se definen como entradas de flujo cuyos valores se

establecen para cada simulación, mientras que las salidas se definen a una presión manométrica de 0 bar.

Las partículas de polvo de fase discreta se consideran una fase dispersa debido a su baja fracción de volumen dentro del flujo de gas. Por lo tanto, se aplica la aproximación de Euler-Lagrange, recomendada por el software para este tipo de problemas. Las partículas de polvo se rastrean en función de las fuerzas que actúan sobre cada una de ellas.

El modelo CFD se define como estacionario y se emplea un método de solución basado en la presión. Para el problema acoplado de presión y velocidad, se emplea el algoritmo SIMPLE y se considera la gravedad en el eje Z con un valor de $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Además, se considera un modelo de turbulencia SST k-omega, que se acepta como la alternativa universalmente recomendada para este tipo de problemas. Se impone un criterio de convergencia de 10^{-4} para todos los residuos y, alternativamente, para los casos en los que no se pueden alcanzar estos criterios, se realizaron 10^4 iteraciones para asegurar un régimen estable de los resultados.

No se tiene en cuenta la radiación láser ni el calentamiento de las partículas ni el gas en este modelo de simulación CFD.

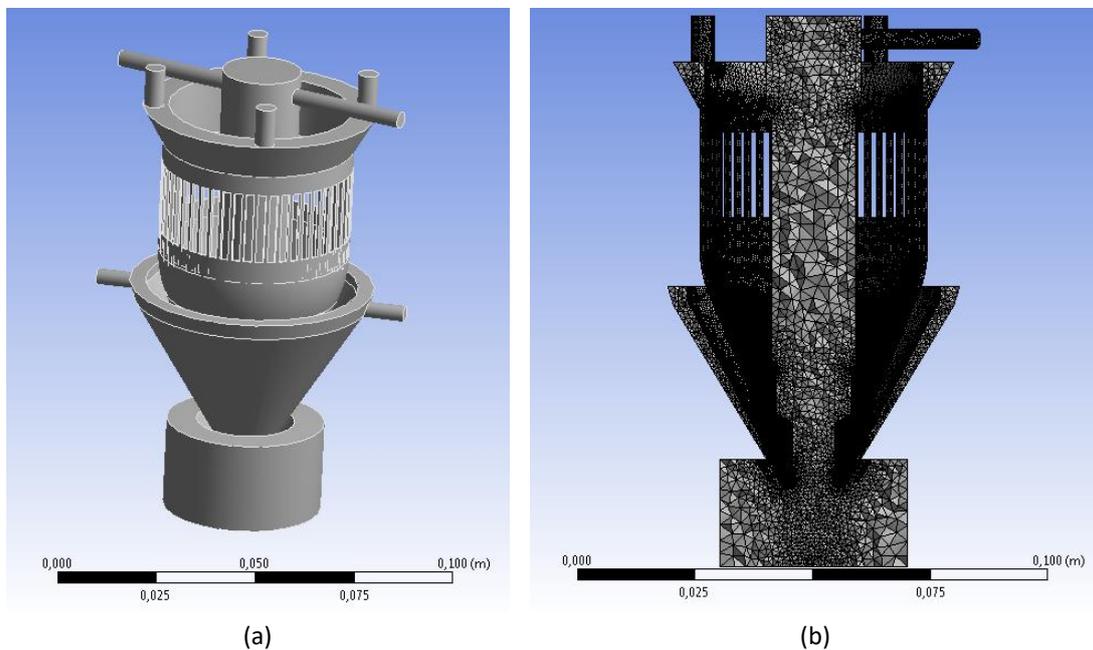


Figura IV.4. (a) Geometría del fluido que recorre el interior de la boquilla y el módulo de gas auxiliar. (b) Mallado de la geometría importada para el modelo de CFD.

IV.4. Resultados de las simulaciones CFD

Se realizan dos tipos de simulaciones. Por una parte, se lleva a cabo una simulación bifásica, en la que se evalúa la existencia de oxígeno a la salida de la boquilla empleando el módulo de gas auxiliar. Y, por otra parte, se considera la influencia de este último en la distribución de las partículas de polvo a la salida de la boquilla.

Los parámetros de entrada para las simulaciones vienen listados en la Tabla II.1Tabla VI.2:

Tabla IV.2. Condiciones de contorno para las simulaciones del modelo CFD

Parámetros de entrada	Valor de la condición de contorno
Flujo de gas portador [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	5,0
Flujo de gas de protección [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15,0
Flujo de gas auxiliar	A determinar por el estudio del modelo CFD
Flujo másico de polvo [$\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$]	5,0

En la Figura IV.5.(a) se aprecia como la concentración de polvo es máxima coincidiendo con el eje axial de la boquilla de DED-LB. La distancia medida desde la salida de la boquilla hasta el punto donde la concentración es máxima se define como distancia al plano focal del polvo y es donde se dirigirá el haz láser para maximizar la cantidad de material aportado.

En la Figura IV.5.(b) se puede observar como la presencia de argón es máxima en el interior de la boquilla y a su salida, pero que va disminuyendo a medida que se aleja del centro de la misma. La concentración de argón se representa en tanto por uno frente a la de oxígeno.

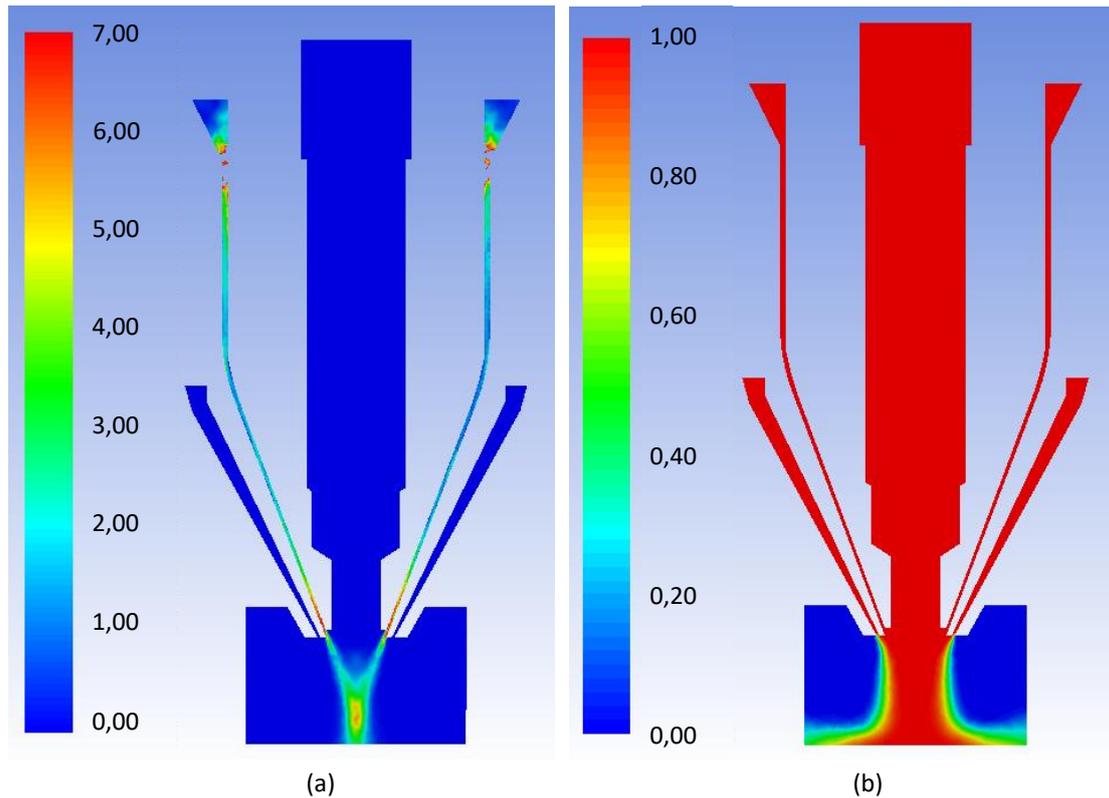


Figura IV.5. (a) Resultados de concentración de polvo en el modelo CFD. (b) Resultados de fracción de volumen de gas argón en el modelo CFD

En cuanto a los resultados obtenidos para la distancia de separación de 1 mm entre caras, las concentraciones de oxígeno resultan inferiores al 0,002% en la posición del plano focal del polvo, donde se mide una concentración máxima de polvo de $5,59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y cuya distancia desde la salida de la boquilla es de unos 13 mm. Aunque el máximo de concentración de polvo se encuentra en un punto concreto, se observa que existe una zona de escasa variación cercana al punto máximo y a lo largo del eje axial. Esta zona, comprendida entre los 12 y los 14 mm medidos desde la salida de la boquilla y que contienen obviamente al punto máximo, muestra una concentración media de $5,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, aproximadamente.

Por otra parte, y con respecto al valor de separación de 0,5 mm entre caras, la distancia al plano focal del polvo es de 13,7 mm desde la salida de la boquilla. El valor máximo de concentración de polvo en ese plano es de $5,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, y las concentraciones de oxígeno son inferiores al 0,35 %. Al igual que sucedía en el caso anterior, existe una zona en la que la concentración de polvo varía sólo ligeramente con respecto al punto máximo. En las distancias comprendidas entre los 13,2 y 14,5 mm desde salida de la boquilla, la concentración media es ligeramente superior a $5,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

En vista de los resultados arrojados por las simulaciones, el diseño que incluye una distancia de separación de 1 mm entre caras presenta un mejor rendimiento en lo que respecta a las

concentraciones de gas y polvo. Por lo tanto, se selecciona esta alternativa para su posterior fabricación y pruebas de validación.

IV.5. Fabricación y validación

El módulo accesorio de la boquilla EHU-COAX2015 se fabrica íntegramente en el Taller Mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU.

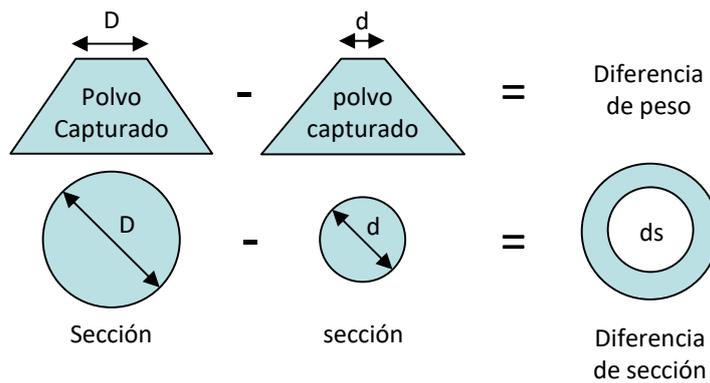
Una vez mecanizado e instalado el nuevo módulo de gas auxiliar para materiales altamente reactivos, se procede con distintas pruebas experimentales y comparaciones del rendimiento real con los resultados obtenidos en las simulaciones para confirmar su funcionamiento, tanto en lo que respecta a la concentración de polvo como a la concentración de argón u oxígeno.

IV.5.1. Concentración de polvo

Para determinar la concentración de polvo a la salida de la boquilla se utiliza un sistema de medición mecánico de desarrollo propio. El procedimiento realiza una discretización de la concentración de polvo para compararla con puntos de la simulación. La metodología de medición consiste en inyectar polvo en un recipiente al que se ajustan distintas tapas cónicas con orificios de entrada calibrados con diferentes diámetros, a lo largo de un periodo de tiempo fijo. A continuación, el polvo recogido se pesa con una balanza de precisión y la medición resultante se utiliza como indicador de la concentración de polvo. El proceso de recogida de polvo y el esquema de la discretización se muestran en la Figura IV.6.

El conjunto de tapas incluye orificios de entrada de 10, 5, 4, 3, 2 y 1 mm de diámetro, que limitan la cantidad de polvo recogido. Además, las tapas tienen forma cónica para evitar que las partículas de polvo que no entran en el orificio entren en el contenedor debido a rebotes o acumulación. El contenedor cuenta con una válvula de escape, para evitar la acumulación de gas pero que a su vez evita la salida de las partículas de polvo.

El rendimiento del sistema de gas auxiliar se analiza en tres situaciones diferentes: El caso en el que no se utiliza ningún flujo de gas auxiliar [$0 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ de gas argón], el caso en el que se utiliza el flujo de gas auxiliar óptimo según la simulación [$10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$] y el caso en el que se duplica el flujo de gas auxiliar [$20 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$].



$$\frac{\text{Diferencia de peso}}{\text{Diferencia de sección}} = \text{Concentració de polvo discreta}$$

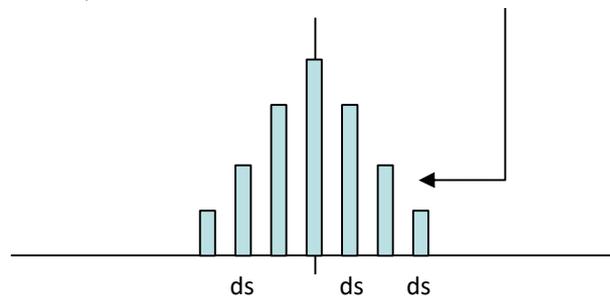


Figura IV.6. Proceso de discretización de la concentración de polvo.

Los resultados de los ensayos de concentración de polvo realizados con tres caudales de gas auxiliar diferentes se muestran en la Figura IV.7, donde se aprecia la concentración de polvo en función de la distancia desde el centro de la boquilla.

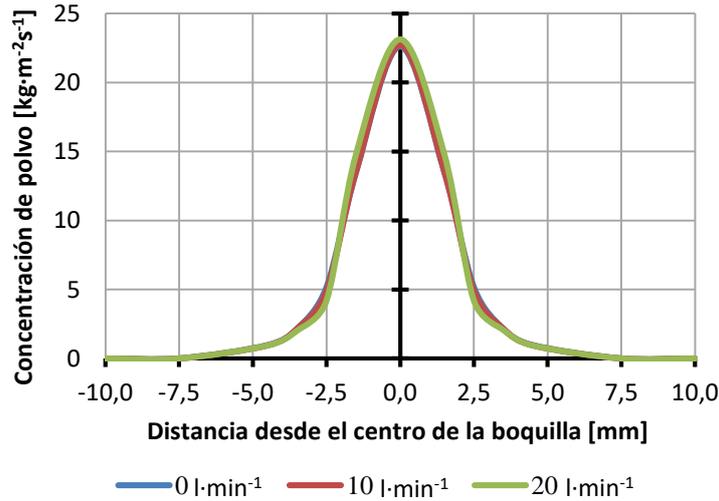


Figura IV.7. Concentración de polvo a diferentes caudales de gas auxiliar.

En la Tabla IV.3 se muestran los valores de las concentraciones de polvo máximas obtenidas para los tres caudales de argón. En esta tabla puede observarse que el aumento del caudal de gas auxiliar no influye en la concentración de polvo, que apenas varía ligeramente.

Tabla IV.3. Resumen de concentraciones de polvo en función del flujo de gas auxiliar.

	0 l·min ⁻¹	10 l·min ⁻¹	20 l·min ⁻¹
Concentración máxima de polvo [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	22,62	22,71	23,13

En la Figura IV.8, se presenta una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y el flujo de polvo simulado en el modelo CFD para el caso en que se utiliza un flujo de gas auxiliar adicional de 10 l·min⁻¹. Se estima que el acuerdo entre ambas curvas es suficiente para dar por válida la simulación de la concentración de polvo.

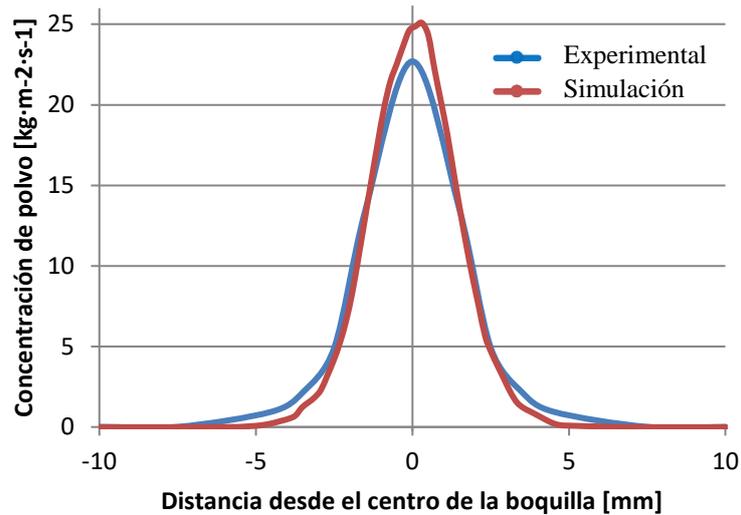


Figura IV.8. Comparación de resultados experimentales y simulados de concentración de polvo.

IV.5.2. Concentración de oxígeno

La calidad de la atmósfera protectora generada se analiza midiendo la concentración de oxígeno a la salida de la boquilla. Para ello, se coloca un analizador de oxígeno ZR800 (Systech Illinois) a diferentes alturas ($z = 0$ mm y $z = 5$ mm medidas desde el sustrato) como muestra la Figura IV.9, mientras que se suministran distintos caudales de argón como gas auxiliar (0 , 10 y 20 l·min⁻¹). La toma de oxígeno se desplaza a puntos cada vez más alejados del centro de la boquilla, manteniendo la misma altura, para obtener las diferentes medidas de la distribución del gas en la zona cercana a donde se realizarán los aportes de material altamente reactivos.

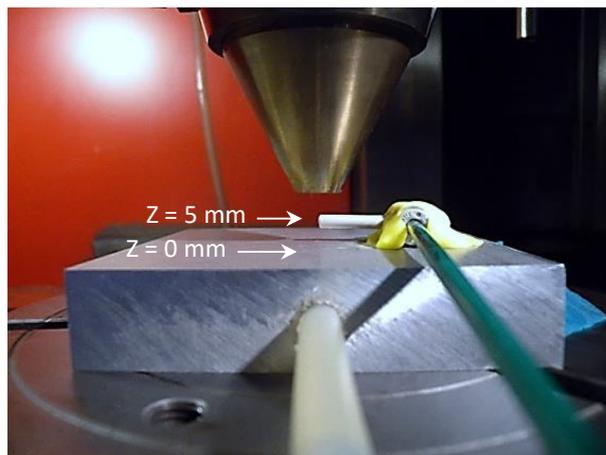


Figura IV.9. Instalación del medidor de oxígeno

Cada caudal de argón genera distintas distribuciones de la concentración de oxígeno (Figura IV.10 y Figura IV.11). Pero en todos los casos se observa que cuanto más cerca del centro de la

boquilla se realiza la medida, menor es la concentración de oxígeno y por lo tanto se obtiene un resultado acorde a la intención del diseño.

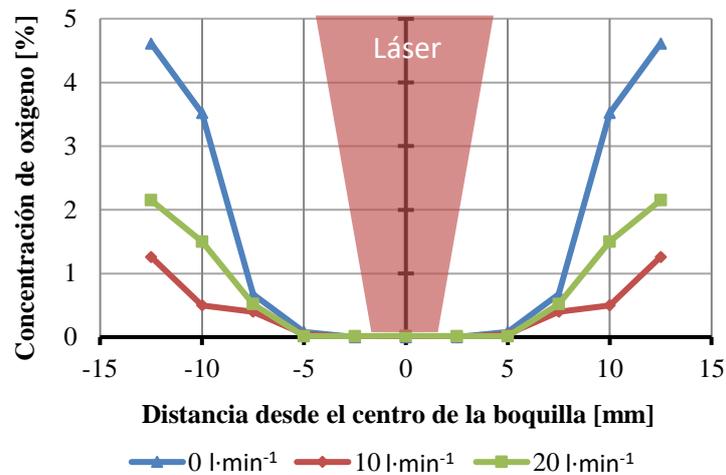


Figura IV.10. Concentraciones de oxígeno de diferentes caudales de gas auxiliar, a 0 mm del sustrato.

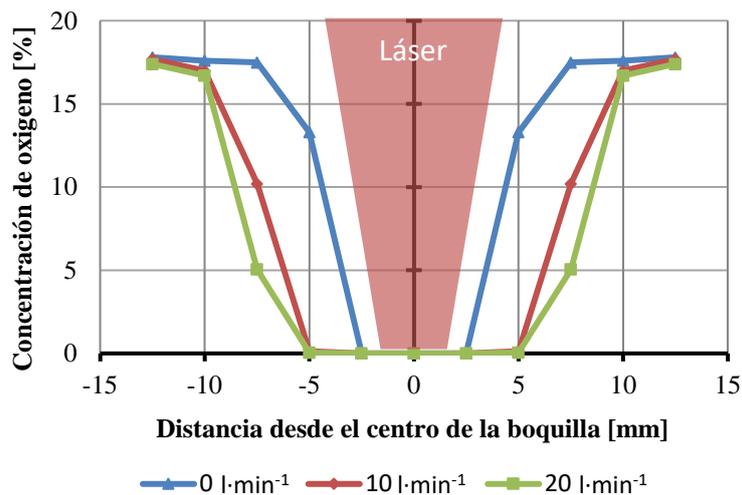


Figura IV.11. Concentraciones de oxígeno de diferentes caudales de gas auxiliar, a 5 mm del sustrato.

En la Figura IV.12, se muestra una comparación entre los resultados reales y los simulados en el modelo CFD, para el caso de un caudal de gas auxiliar de 10 l·min⁻¹. El ajuste entre ambas curvas determina que la concentración de oxígeno medida experimentalmente coincide con la simulada y por lo tanto confirma que la utilización del módulo de gas auxiliar para el aporte de materiales altamente reactivos funciona correctamente.

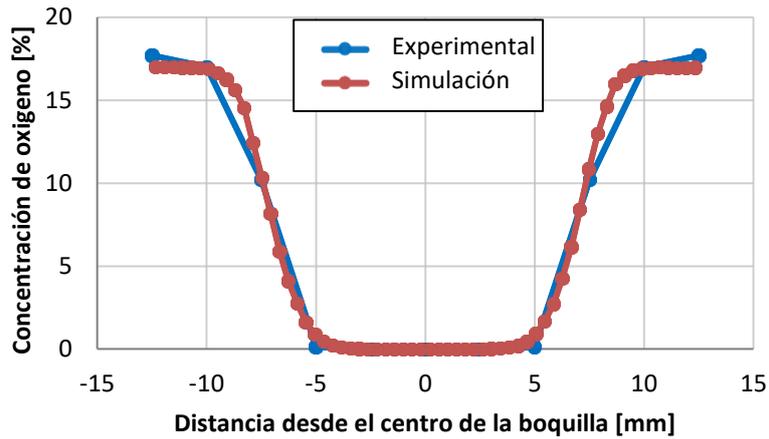


Figura IV.12. Comparativa de resultados simulados y experimentales de concentración de oxígeno.

IV.6. Discusión de resultados y conclusiones

En lo que respecta a las pruebas de concentración de polvo, se obtienen resultados muy similares para todos los valores de caudal de gas auxiliar evaluados. Sin embargo, se obtienen concentraciones de polvo ligeramente superiores con los caudales de gas más elevados. Así, se alcanza una concentración máxima de polvo de $23,13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ con un caudal de gas de $20 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, lo que aumentaría la eficiencia del proceso.

En cuanto a los resultados de la concentración de oxígeno, se realizaron dos mediciones. A una altura de 5 mm del sustrato se observa que cuanto mayor es el caudal de gas auxiliar, mayor es el área con menor concentración de oxígeno. Sin embargo, en la superficie del sustrato, a 0 mm, se alcanzan concentraciones de oxígeno más bajas para un caudal de gas de $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ en lugar de $20 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Este efecto se produce como consecuencia de los fenómenos de turbulencia originados a la salida de la boquilla. Estas turbulencias atrapan el oxígeno a su alrededor y provocan un deterioro de la atmósfera inerte. En consecuencia, con un caudal de gas auxiliar de $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ se garantizan mejores condiciones, que utilizando caudales mayores. Una representación de la generación de estos fenómenos de turbulencia se muestra en la Figura IV.13, donde se aprecia el parámetro de intensidad de turbulencia. La intensidad de turbulencia, I , se define como el cociente entre media cuadrática de las fluctuaciones de velocidad, u' , y la velocidad media del flujo, U .

$$I = \frac{u'}{U}$$

$$u' = \sqrt{\frac{u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2}{3}}$$

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

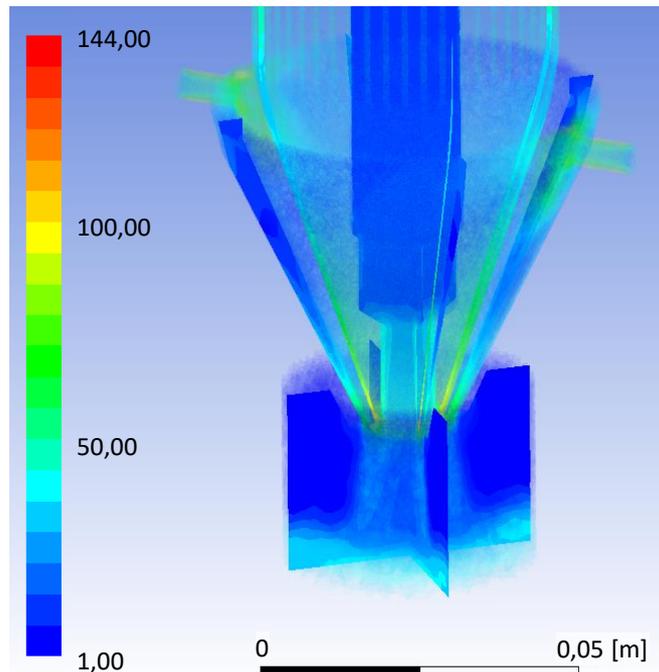


Figura IV.13. Intensidad de turbulencia simulada en el total del fluido (boquilla + módulo de gas de auxiliar).

A la vista de los resultados de las distintas pruebas realizadas, se concluye que un caudal de $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ de gas auxiliar suministrado por el módulo accesorio a la boquilla de aporte es el valor que combina una concentración de polvo y oxígeno favorables para el correcto procesamiento de materiales altamente reactivos.

IV.7. Ensayos de resistencia a la corrosión para piezas fabricadas en Ti6Al4V

Habiendo conseguido una solución fiable para la generación de una atmósfera inerte local que permita el proceso de DED-LB con materiales altamente reactivos, queda pendiente emplearla en la fabricación muestras que puedan ser analizadas. Incluso con un proceso exitoso de fabricación aditiva sin oxidación, la resistencia a la corrosión resultante debe ser evaluada para asegurar la calidad del material añadido.

El presente estudio evalúa la resistencia a la corrosión de piezas fabricadas en aleación de titanio, Ti6Al4V mediante un proceso DED-LB con inyección de polvo y la solución de atmósfera inerte local mencionada anteriormente.

IV.7.1. Metodología y procedimiento experimental

Los experimentos de FA se llevan a cabo con la boquilla de DED-LB de desarrollo propio EHU-COAX2015 y su módulo de gas auxiliar para materiales altamente reactivos. El equipo y célula láser empleados, así como los materiales base y de aporte vienen detallados en el CAPÍTULO III.

Con el fin de lograr la misma superficie para todas las pruebas de corrosión, se propone fabricar una geometría cilíndrica. Los parámetros del proceso se basan en trabajos anteriores [Cortina et al. 2018] y se fija en 700 W la potencia láser, con un diámetro de foco de 1,6 mm, una velocidad de avance de $800 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, y un flujo másico de polvo de $3 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Los flujos de gas de protección, portador y auxiliar se fijan en $15,0 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, $4,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ y $10,0 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente.

Se emplea un patrón en zigzag como se muestra en la figura, cambiando el punto de inicio y el ángulo del patrón para cada capa, para asegurar una pieza homogénea (Figura IV.14). La temperatura se monitoriza mediante un pirómetro digital de dos longitudes de onda con el fin de garantizar una temperatura constante y evitar el sobrecalentamiento de las piezas.

Las piezas fabricadas por el proceso aditivo y el material base empleado como sustrato se mecanizan para obtener superficies con idénticas dimensiones para los ensayos de corrosión. El resultado es un conjunto de tres cilindros de 25 mm de diámetro y 45 mm de altura, Figura IV.15. A partir de los cuales se obtienen 6 probetas de fabricación aditiva, cortando secciones transversales de 5 mm de espesor. Mientras que un ánodo de referencia con el que comparar se mecaniza a partir de un tocho de Ti6Al4V.

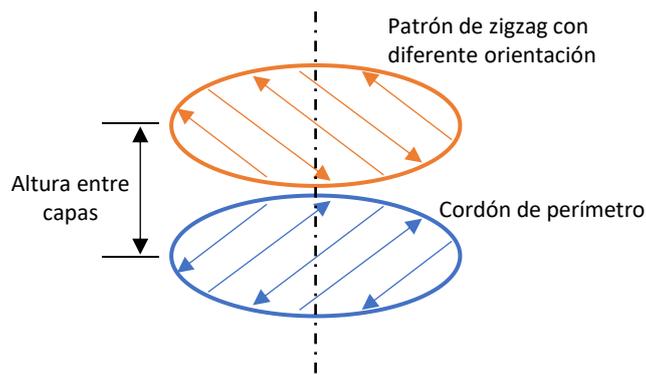


Figura IV.14. Estrategia de fabricación para las probetas de Ti6Al4V.

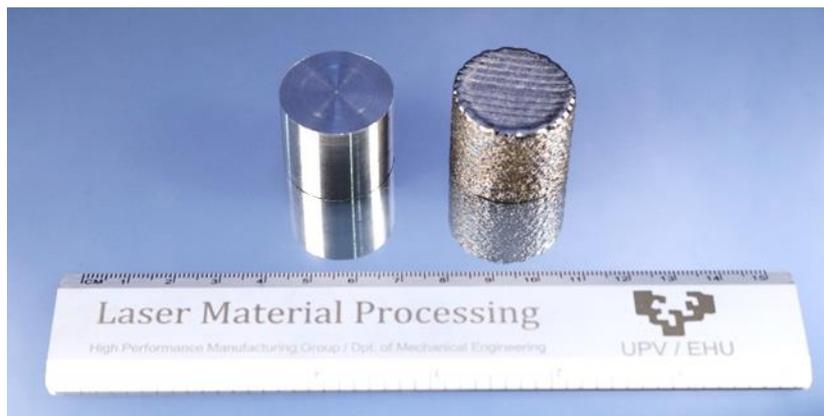


Figura IV.15. Probeta de fabricación aditiva (derecha), y probeta mecanizada posteriormente (izquierda).

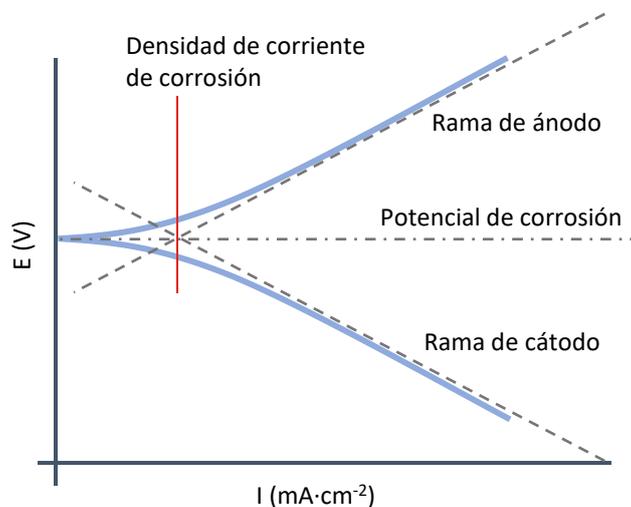


Figura IV.16. Ejemplo de curva Tafel

Posteriormente, se realizan los ensayos electroquímicos para obtener las curvas Tafel (Figura IV.16) de dichas muestras. Para ello se emplea un potenciostato biológico VSP-300 y se realizan los ensayos de potencial de circuito abierto (en inglés *Open Circuit Potential*, OCP) y de polarización potenciodinámica. Se utiliza una configuración de tres electrodos: uno de trabajo (1 cm^2 de la muestra) expuesto a un volumen de 250 ml de electrolito en reposo (3,5 % en peso de NaCl), una malla de platino como contraelectrodo y un electrodo saturado de calomelano (SCE, KCl saturado) como electrodo de referencia. El OCP se monitorizó durante 3 horas antes

de realizar el ensayo de polarización utilizando una velocidad de barrido de $0,167 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ desde $-0,3 \text{ V}$ hasta $3,0 \text{ V}$ con respecto al OCP.

IV.7.2. Resultados y discusión

Las probetas se ensayan sumergiendo una cara en una solución de NaCl durante 180 minutos hasta su estabilización, mientras se toman medidas del potencial de circuito abierto (OCP) en la cara opuesta. La Figura IV.17 muestra dos curvas de ejemplo para una muestra fabricada por tecnología aditiva y otra del material base, ambas trazadas en función del tiempo.

Se aplican diferencias de potencial a las muestras para obtener las curvas de Tafel. Las muestras fabricadas aditivamente muestran un comportamiento similar frente a la corrosión cuando se comparan con las muestras de material base utilizadas como referencia. Las Figura IV.18 (a) y (b) presentan dos curvas de Tafel diferentes, en las que pueden observarse estos resultados, y la figura (c) muestra cómo una muestra fabricada aditivamente tiene una resistencia a la corrosión ligeramente superior.

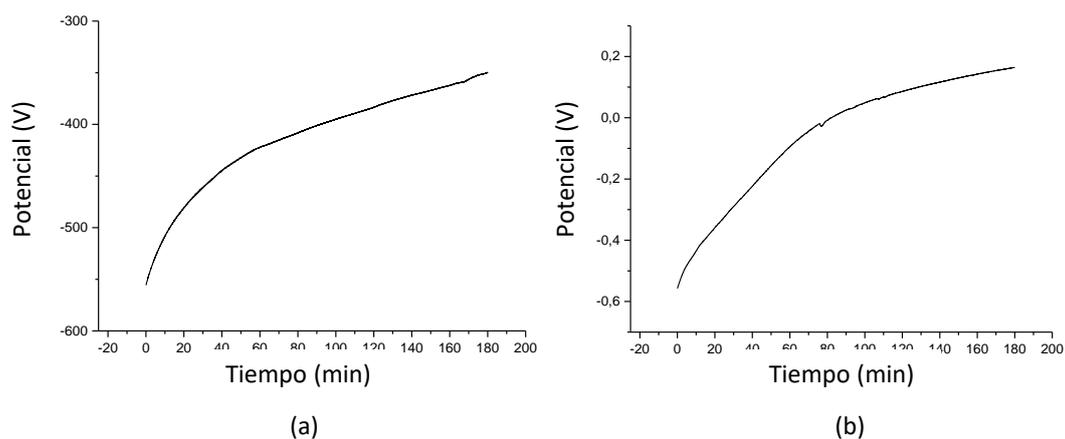


Figura IV.17. (a) Potencial de circuito abierto para el material base. (b) Potencial de circuito abierto en pieza de fabricación aditiva.

Los resultados obtenidos se resumen en un OCP y un potencial de corrosión medios de $0,265 \text{ V}$ y $0,270 \text{ V}$ respectivamente para la muestra de referencia, mientras que, para las probetas de fabricación aditiva, estos valores son $-0,138 \text{ V}$ y $-0,215 \text{ V}$. El resultado superior obtenido para el material fabricado mediante DED-LB alcanza un OCP de $-0,350 \text{ V}$ y un potencial de corrosión de $-0,358 \text{ V}$.

Los resultados muestran que las probetas de titanio, fabricadas por tecnología aditiva, presentan una resistencia a la corrosión del mismo orden de la del material de referencia y no

se produce oxidación resultante del proceso de deposición. Por lo tanto, el proceso de fabricación aditiva y el uso de una atmósfera inerte local combinan sus ventajas y proporcionan un proceso de fabricación alternativo para la aleación Ti6Al4V, que es ampliamente utilizada en la industria.

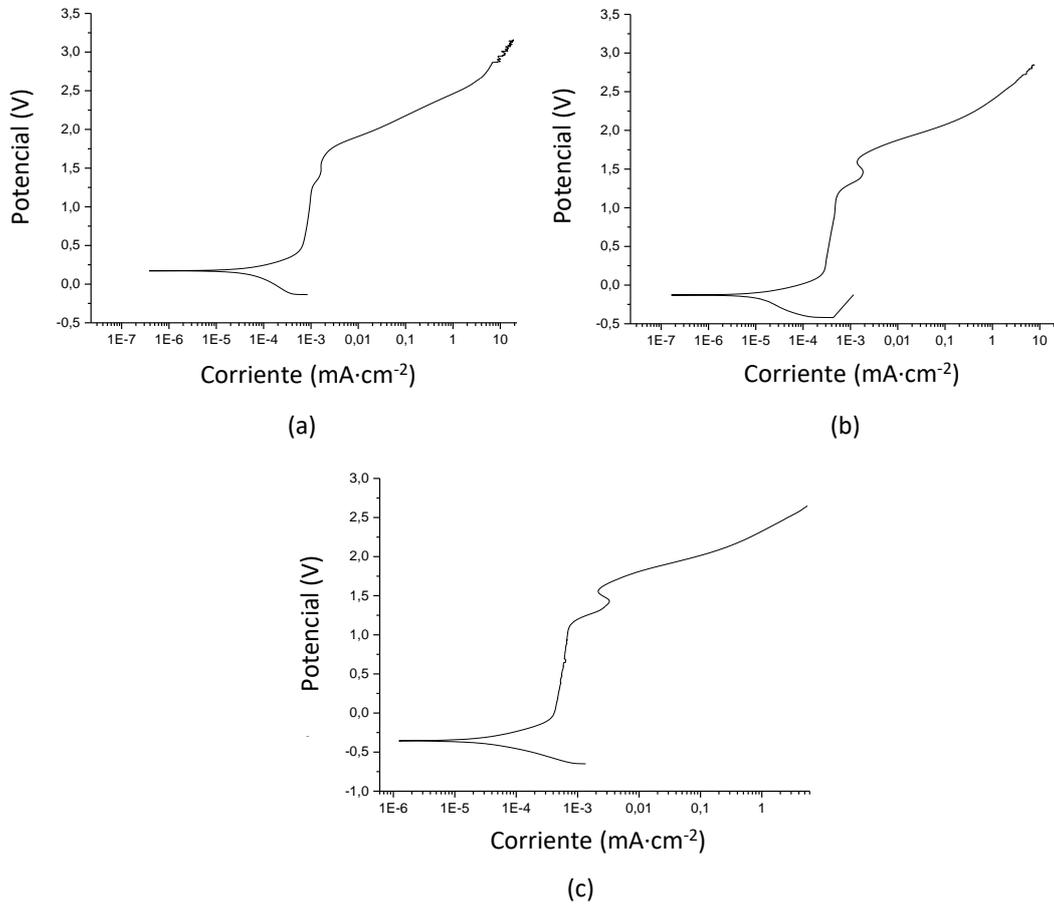


Figura IV.18. (a) Curva Tafel para el material base. (b) Curva Tafel para el material fabricado por aditivo. (c) Curva Tafel del material fabricado con aditivo y mayor resistencia a la corrosión.

CAPÍTULO V. Optimización del consumo de gas en el proceso de
DED-LB con materiales altamente reactivos

CAPÍTULO V. Optimización del consumo de gas en el proceso de DED-LB con materiales altamente reactivos.

En este capítulo se propone una alternativa para generar una atmósfera protectora local con un diseño de boquilla optimizado. Una atmósfera protectora asimétrica que permita introducir argón sólo donde es necesario y que reduzca el consumo de gas, lo que se traduciría en un ahorro de costes y un aumento de la sostenibilidad del proceso. Basándose en simulaciones con modelos CFD, se evalúa una atmósfera protectora asimétrica y se estudian las posibles variaciones en la distribución del polvo. Los resultados obtenidos se comparan con dos casos de referencia. El primero, con una atmósfera protectora simétrica creada por una boquilla continua coaxial convencional con un módulo de gas auxiliar coaxial y continuo. El segundo, con una boquilla continua coaxial sin flujo de gas auxiliar. Por último, se analiza el impacto de la atmósfera protectora asimétrica para diferentes velocidades de avance, analizando la eficiencia másica del proceso y la posible oxidación del material.

V.1. Metodología

Para la evaluación de la atmósfera protectora asimétrica en el proceso de DED-LB se emplea una metodología que combina análisis numérico mediante CFD y ensayos experimentales. Como se detalla se en la Figura V.1, se realizan cuatro análisis diferentes para evaluar el comportamiento de la boquilla. En primer lugar, las pruebas denominadas S1 se centran en analizar la atmósfera protectora generada. En segundo lugar, las pruebas S2 examinan el flujo de polvo generado en diferentes situaciones de protección. Posteriormente, las pruebas S3 estudian la relevancia de la velocidad de avance en la eficiencia del proceso DED-LB. Y, por último, las pruebas S4 se centran en el estudio de la eficacia de la atmósfera generada para la protección del proceso y el riesgo de oxidación del material depositado a diferentes velocidades de avance. Los dos primeros conjuntos de ensayos, S1 y S2, tienen como objetivo validar empíricamente el modelo CFD para la configuración asimétrica, así como realizar la correspondiente comparación con las configuraciones simétrica de protección total (con gas auxiliar) y la configuración convencional sin gas auxiliar. Posteriormente, el modelo CFD validado se emplea para analizar el proceso en los estudios S3 y S4 variando la velocidad de avance.

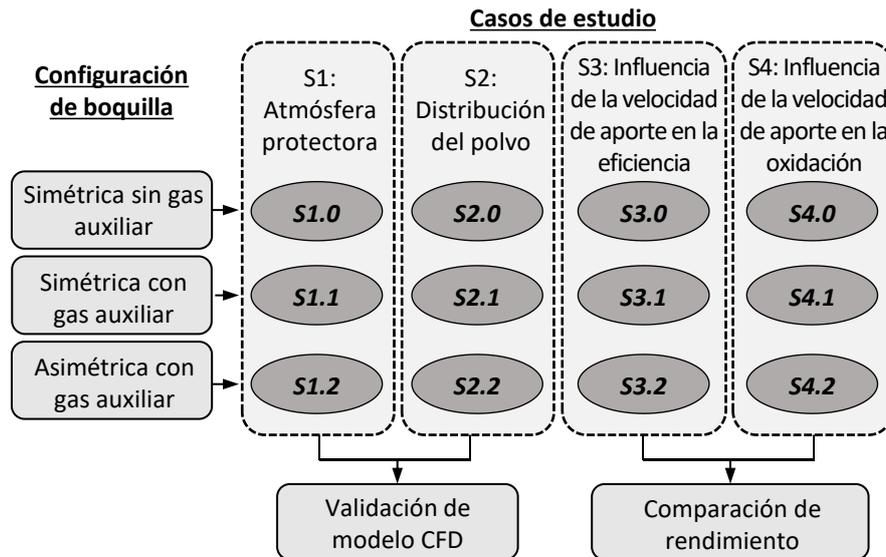


Figura V.1 Metodología para el análisis de los flujos de gas en una boquilla asimétrica de DED-LB.

En el estudio S3, el rendimiento del caudal másico del proceso se evalúa como resultado de la relación entre la masa de polvo inyectada en el baño de fusión y la masa total de polvo suministrada por el alimentador de polvo. En el estudio S4, se miden experimentalmente las temperaturas de enfriamiento para diferentes velocidades de avance con el fin de determinar la zona que supera los 700 K, obteniendo la región donde las aleaciones de titanio necesitan ser protegidas para evitar la oxidación. Por último, se evalúa la validez de las diferentes configuraciones de boquillas para proteger dicha región. Para estudiar la influencia de la velocidad de avance, la potencia del láser y el caudal másico se normalizan con respecto a dicha velocidad. Así, en el presente trabajo, el aporte de calor y flujo másico por unidad de longitud se mantienen constantes en los valores $14,6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$ y $6,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente. En todos los casos, se fija una concentración de oxígeno de 50 ppm como umbral máximo permitido para evitar la oxidación del material calentado.

V.2. Montaje experimental para la validación del cabezal de aporte asimétrico

Como diseño de referencia se utiliza una boquilla coaxial continua, desarrollada previamente por el grupo de investigación (EHU-COAX2015). El esquema de esta boquilla se muestra en la Figura V.2. (a). Este diseño se ha utilizado para inyectar polvo en el proceso DED-LB con materiales no reactivos, tales como diferentes tipos de aceros y aceros para herramientas, aceros inoxidables o aleaciones basadas en níquel. Basándose en este diseño inicial, se añade un cono exterior a la boquilla, que suministra un flujo de gas auxiliar coaxial, tal y como se detalla en el CAPÍTULO IV. Este suministro extra de gas aumenta el área protegida alrededor del baño

de fundido para su aplicación en materiales reactivos, como las aleaciones de titanio. El esquema de esta segunda configuración se muestra en la Figura V.2. (b).

Por último, presentando la propuesta de este capítulo en la Figura V.2. (c), se diseña un cono exterior asimétrico con una ranura de 90°. Por lo tanto, este diseño bloquea el flujo del gas de auxiliar excepto en un segmento anular de 90°. De esta forma, es posible guiar el flujo de gas auxiliar directamente hacia la zona de deposición del material, mejorando la eficiencia y reduciendo el consumo de gas.

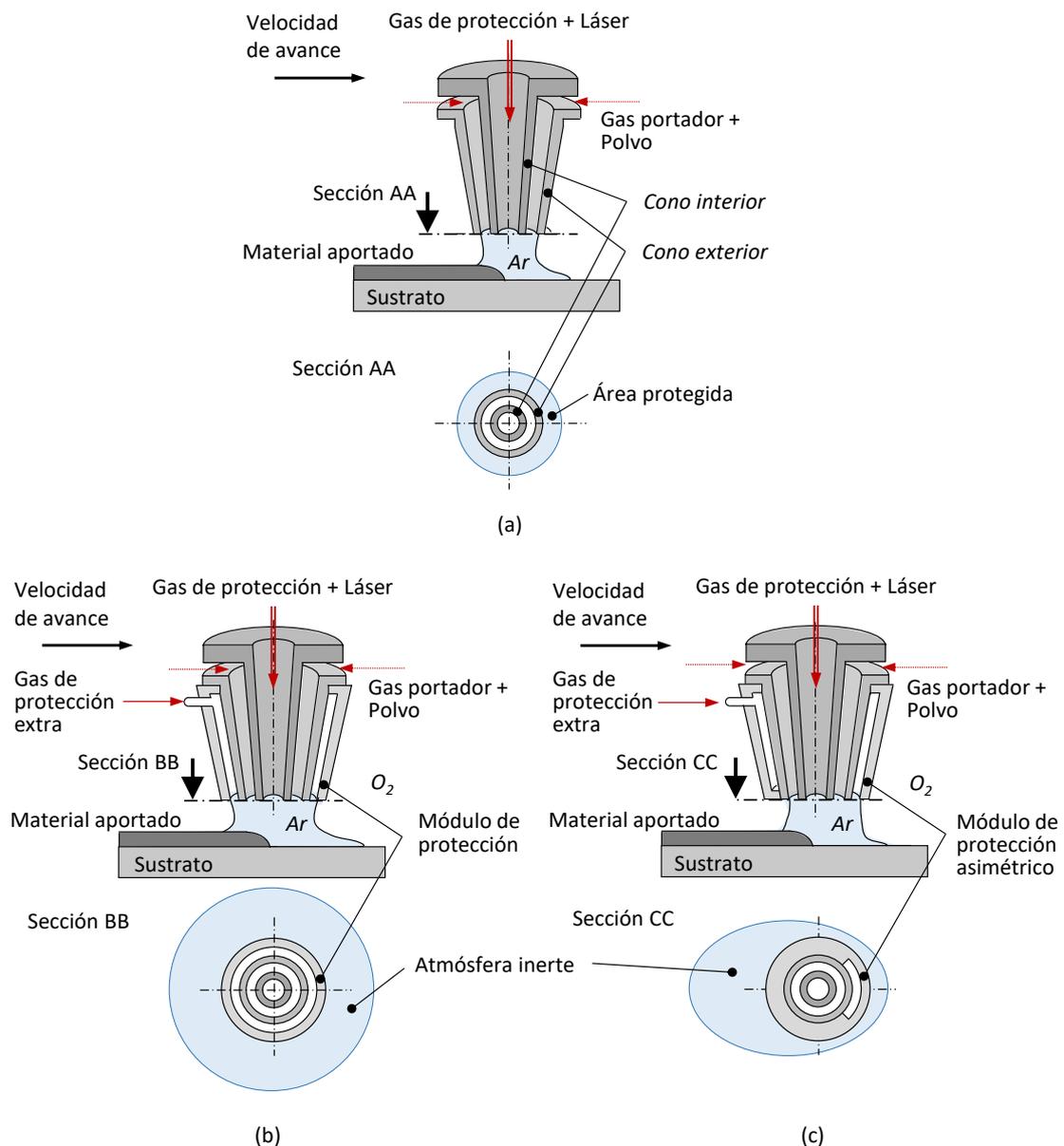


Figura V.2. Esquema de las diferentes configuraciones de las boquillas: (a) sin gas auxiliar, (b) con gas auxiliar simétrica, y (c) con gas auxiliar asimétrica

Para obtener unas condiciones de deposición óptimas, tanto el haz láser como el flujo de partículas de polvo se centran en el plano focal, situado a 15 mm de la punta de la boquilla. En el presente estudio, se emplea argón con una pureza del 99,998 %, como gas de protección, portador y auxiliar. El contenido total de oxígeno en el Ar es inferior a 3 ppm, por lo que el gas se considera como puro para las simulaciones CFD. La boquilla se instala en un centro láser de 5 ejes y su posición se controla mediante un control CNC Fagor 8070. La concentración de oxígeno en puntos discretos se mide con un analizador de oxígeno ZR800 de Systech Illinois. El analizador ZR800 se basa en una tecnología de zirconio para la medición de oxígeno, que permite detectar con precisión contenidos de oxígeno tan bajos como 0,1 ppm.

En cuanto a las pruebas experimentales, se emplea polvo de aleación de titanio, Ti6Al4V, que se suministra mediante un alimentador de polvo rotativo gravimétrico y se monitoriza a través de un sensor *Flow Watch*, que mide el flujo másico y garantiza un régimen estable de polvo. Todo el equipamiento y la composición química y distribución de tamaño de partículas vienen detallados en el CAPÍTULO III.

La concentración de polvo se evalúa combinando dos procedimientos, el análisis de imágenes de alta resolución y la medición mecánica mediante el pesaje de una fracción del flujo másico de polvo. Las imágenes de alta resolución se procesan mediante la herramienta "*Image Processing Toolbox*" de Matlab 2020b para obtener imágenes en escala de grises. Estas imágenes representan cualitativamente la concentración de polvo en diferentes puntos: el color blanco indica la concentración máxima de polvo, mientras que el color negro indica la concentración mínima de polvo. A continuación, las imágenes en escala de grises se calibran mediante mediciones mecánicas discretas, en las que el flujo de masa se pondera utilizando un conjunto de contenedores con diferentes diámetros de entrada.

La metodología seguida para el procedimiento de medición mecánica se detalla en el CAPÍTULO IV en la Figura IV.6. El conjunto de contenedores tiene un tamaño de diámetro de entrada creciente, lo que permite obtener mediante operaciones booleanas el polvo atrapado en las secciones anulares discretas y, por último, la función de concentración de polvo se define en función de su distancia a la línea central.

V.3. Descripción del modelo numérico

Para analizar los diferentes flujos de gas a la salida de los diseños de boquilla, se emplea el modelo de CFD desarrollado en el CAPÍTULO IV con las modificaciones necesarias para que se ajuste a las necesidades de estos experimentos.

Las partículas de polvo se definen como de forma esférica, con una densidad de $4,43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, y se inyectan desde las cuatro superficies correspondientes a las entradas de gas portador, véase la Figura V.3, con un flujo de masa total de $5 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ y una velocidad de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que es la misma velocidad que la del gas portador en ese punto. Las entradas de gas se definen como entradas de flujo (Tabla V.1), mientras que las salidas se definen a una presión manométrica de 0 bar.

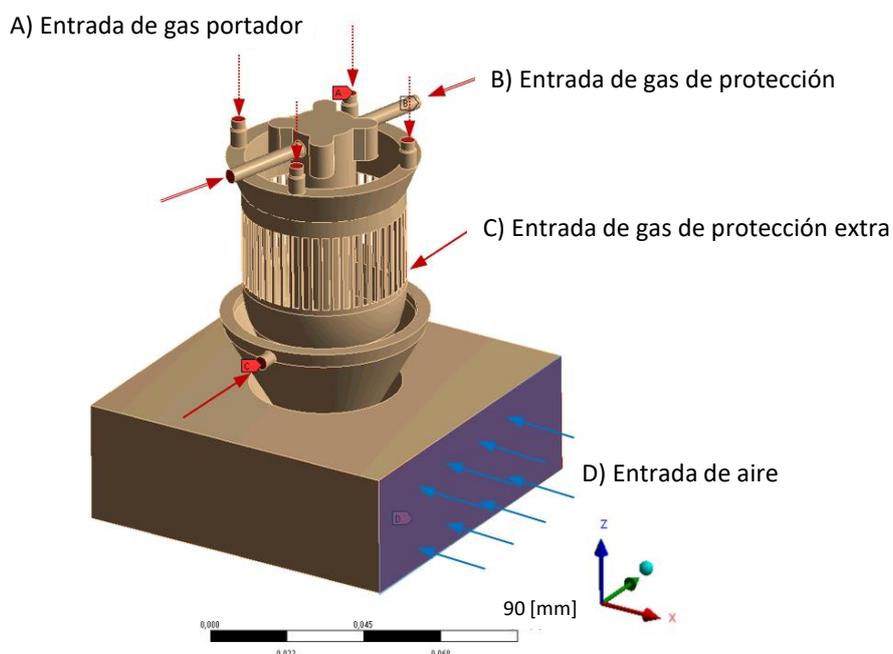


Figura V.3. Condiciones de contorno del modelo.

Tabla V.1. Resumen de los parámetros de entrada en las condiciones de contorno de los diferentes modelos CFD.

Estudio	S1: Atmósfera protectora			S2: Distribución del polvo			S3: Influencia de la velocidad de avance en el rendimiento.	S4: Influencia de la velocidad de avance en la protección frente a la oxidación.		
	S1.0	S1.1	S1.2	S2.0	S2.1	S2.2	S3.2	S4.0	S4.1	S4.2
A) Gas portador [l·min ⁻¹]	5									
B) Gas protector [l·min ⁻¹]	15									
C) Gas auxiliar [l·min ⁻¹]	0	10	2.5	0	10	2.5	2.5	0	10	2.5
Caudal másico [g·min ⁻¹]	0			5						
D) Flujo de aire [mm·min ⁻¹]	0						500-5000	500-5000		

V.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

V.4.1. Influencia de una atmósfera protectora no simétrica en la concentración de oxígeno (S1)

Para el estudio experimental, en este primer estudio S1 se analizan tres configuraciones diferentes de boquilla. En primer lugar, la situación sin gas auxiliar (denominada en lo sucesivo S1.0), en la que sólo se consideran los flujos de gas portador y de gas de protección. A continuación, se considera la configuración de protección total (con gas auxiliar) y simétrica (denominada en lo sucesivo S1.1), en la que se añade un flujo de gas auxiliar de $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Y, por último, se analiza la configuración de boquilla protectora asimétrica (caso S1.2), en la que el flujo de gas auxiliar se reduce a $2,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, ya que la salida anular para dicho flujo de gas también se reduce a una cuarta parte. La nomenclatura y el esquema de cada prueba se muestran en la Figura V.4.

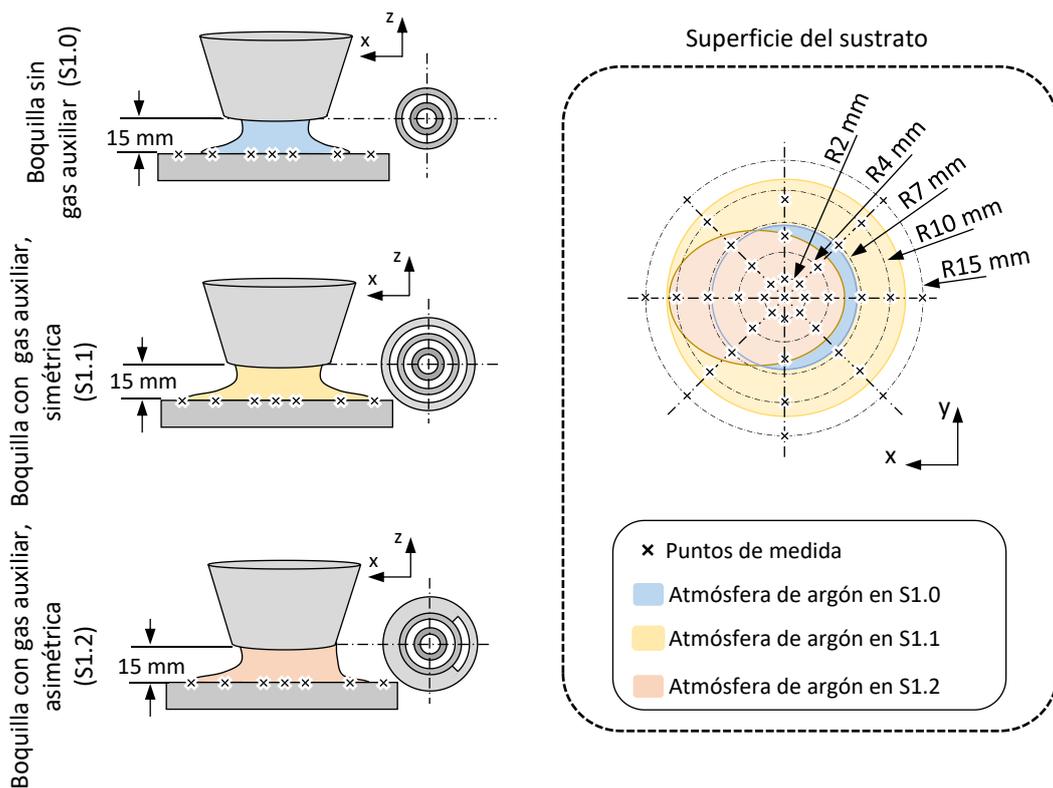


Figura V.4. Esquema de los ensayos experimentales del primer estudio (S1)

El comportamiento de la boquilla se analiza en el plano focal del polvo, donde se encuentra la mayor concentración del flujo de polvo. En el caso de las configuraciones de boquilla estudiadas, esta distancia es de 15 mm en todos los casos.

La concentración de O₂ se mide en 41 puntos distribuidos a lo largo de los ejes OX y OY y sus bisectrices, tal y como se detalla en la Figura V.4. El punto central está alineado con el eje longitudinal de la boquilla que, a su vez, se corresponde con el eje OZ. En la Tabla V.2, se muestran los valores medios de las mediciones experimentales de O₂ para los 3 casos diferentes. Cada prueba se repitió cinco veces y los resultados medios de la desviación estándar están por debajo del 10% del valor medio.

Tabla V.2. Valores medios de las medidas experimentales de la concentración de oxígeno en ppm en puntos discretos. La medida superior se corresponde con S1.0, la intermedia en negrita con S1.1, y la inferior en cursiva con S1.2

		Posición en el eje X [mm]										
		15	10	7	4	2	0	-2	-4	-7	-10	-15
Posición en el eje Y [mm]	15	59200 34000 <i>8200</i>					21800 7000 <i>12500</i>					54000 28500 <i>8000</i>
	10		21700 5000 <i>830</i>				3700 520 <i>980</i>				15500 4500 <i>2000</i>	
	7			5600 570 <i>145</i>			250 24 <i>50</i>			2300 350 <i>120</i>		
	4				160 13 <i>20</i>		18 12 <i>20</i>		30 14 <i>18</i>			
	2					30 11 <i>15</i>	16 12 <i>14</i>	14 12 <i>14</i>				
	0	18000 6200 <i>7200</i>	2900 520 <i>725</i>	500 40 <i>45</i>	90 12 <i>25</i>	30 12 <i>14</i>	13 11 <i>13</i>	15 12 <i>15</i>	85 12 <i>27</i>	130 14 <i>320</i>	2700 240 <i>6400</i>	19500 5000 <i>32450</i>
	-2					34 11 <i>14</i>	28 11 <i>14</i>	14 11 <i>16</i>				
	-4				260 14 <i>30</i>		45 12 <i>18</i>		55 13 <i>30</i>			
	-7			7400 420 <i>110</i>			540 24 <i>45</i>			3350 570 <i>150</i>		
	-10		25100 4400 <i>940</i>				6000 280 <i>650</i>				18200 5000 <i>1200</i>	
	-15	68200 28500 <i>14000</i>					26000 4500 <i>10100</i>					56500 34000 <i>11200</i>

Como puede observarse, independientemente del caso, la concentración en ppm del O₂ en el centro de la boquilla no presenta diferencias significativas. Del mismo modo, la concentración

de oxígeno dentro de un área de 2 mm de radio desde el centro se mantiene por debajo de las 50 ppm en todos los casos. No obstante, a medida que aumenta la distancia, se encuentran diferencias entre los diseños de boquilla y el caso de protección total (S1.1) presenta un comportamiento protector mucho mejor que el del no protector (S1.0). Sin embargo, la boquilla no simétrica se comporta de forma diferente y genera una mayor presión en la región donde se inyecta el gas auxiliar, lo que aumenta la eficacia de la atmósfera protectora en el lado opuesto. En el presente caso, como el gas auxiliar se inyecta desde el lado X- se obtiene un mayor nivel de oxígeno en esta zona, no obstante, el nivel de oxígeno en el lado X+ se mantiene al mismo nivel que en el caso de protección total. Estas diferencias de comportamiento pueden apreciarse fácilmente en la Figura V.5.

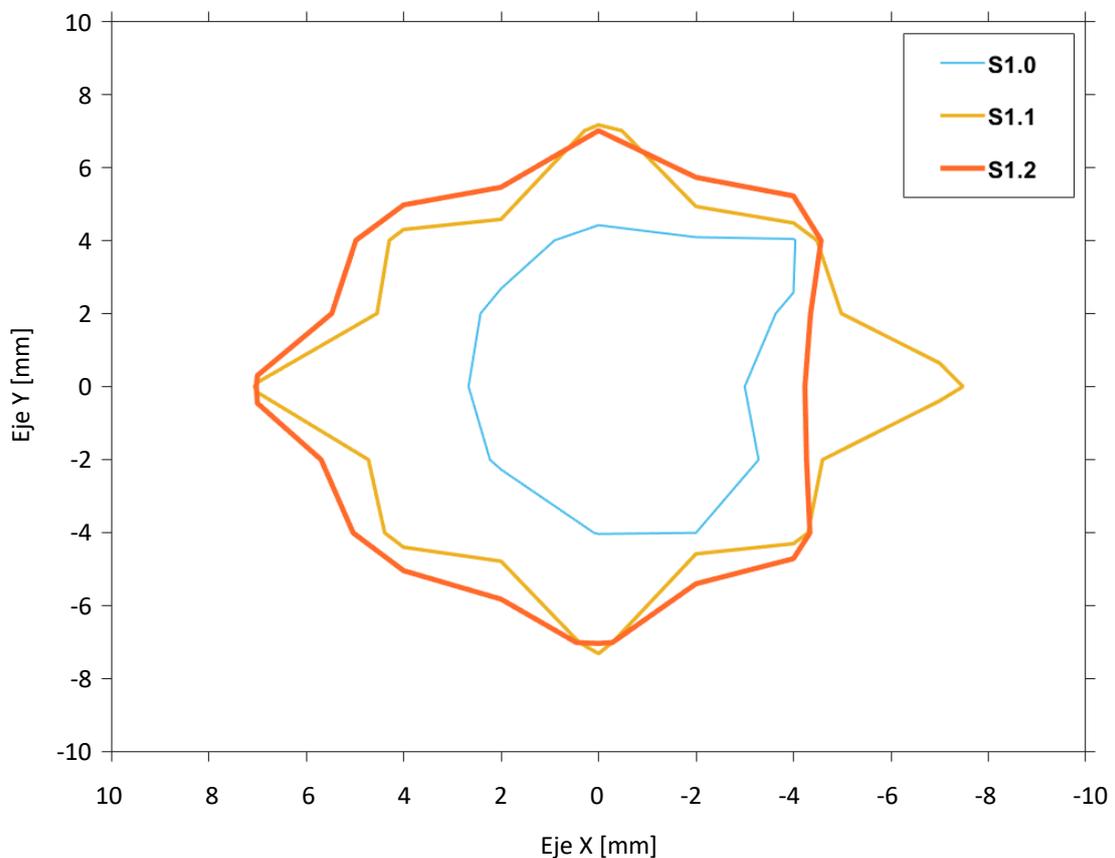


Figura V.5. Mapa de concentración de oxígeno por debajo de las 50 ppm, para los casos de estudio.

Para comparar las mediciones experimentales con los valores de concentración de O_2 proporcionados por el modelo CFD, se mide la concentración de oxígeno a lo largo del eje OX situado en la superficie del sustrato. Las líneas punteadas de la Figura V.6 representan los valores experimentales, mientras que las líneas continuas representan la concentración de O_2 obtenida en las simulaciones CFD. Tanto el modelo como las mediciones experimentales presentan

valores y comportamientos similares. Destaca el caso S1.2, donde se aprecia (tanto en los resultados experimentales como en los numéricos) la concentración de oxígeno no simétrica.

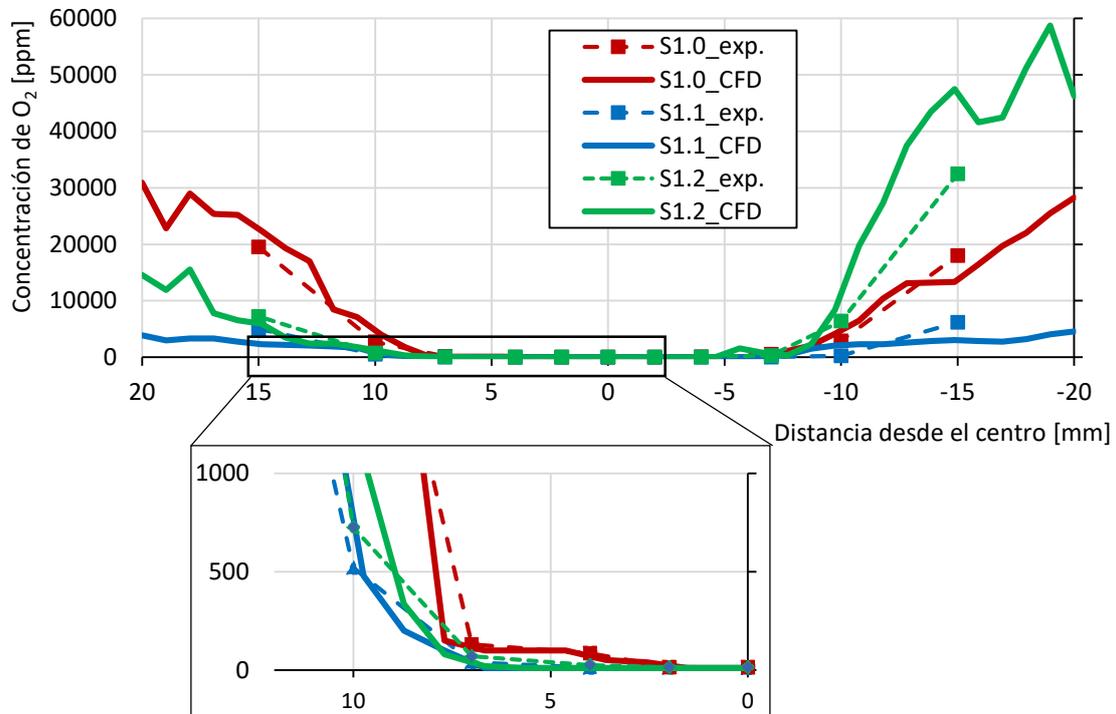
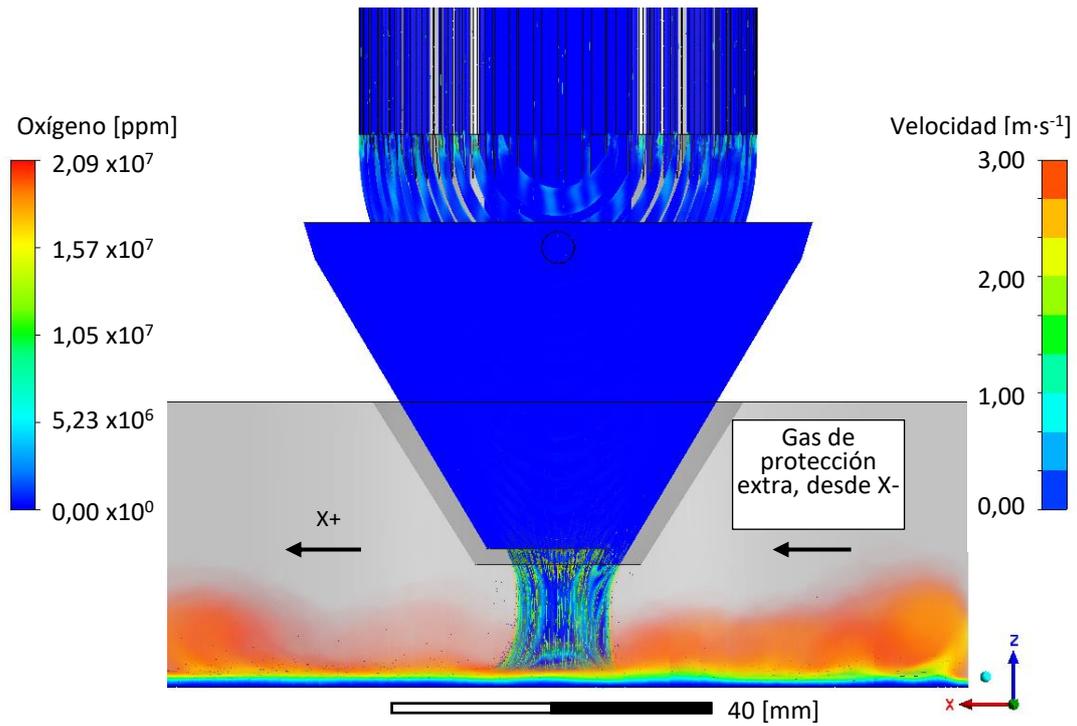
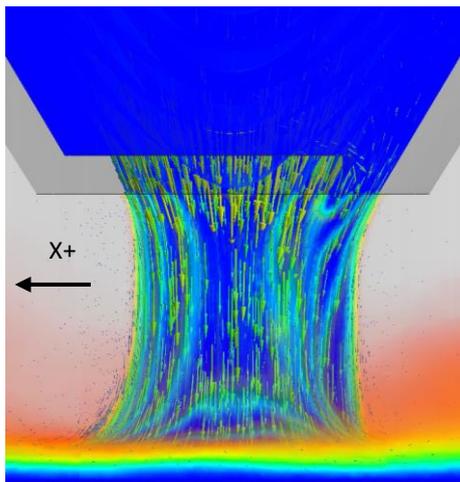


Figura V.6. Concentración de oxígeno en ppm a lo largo del eje OX para las configuraciones analizadas (S1.0, S1.1, y S1.2)

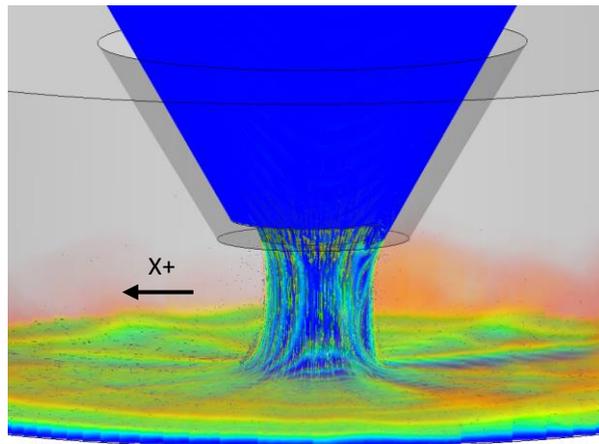
Como puede observarse en la Figura V.7, el flujo de gas auxiliar, que se está introduciendo desde la sección anular (eje X- en la Figura V.7), hace que la atmósfera protectora se curve hacia el lado opuesto (eje X+). En consecuencia, la concentración de oxígeno de la boquilla no simétrica en el lado opuesto al que se está introduciendo el gas auxiliar es similar a la atmósfera protectora completa. En la Figura V.7. (c), se muestra una vista en 3D de la atmósfera protectora asimétrica. Los vectores de magnitud de velocidad se trazan sobre la misma figura para proporcionar más información sobre el rendimiento de la solución propuesta.



(a)



(b)



(c)

Figura V.7. (a) Vista lateral de la atmósfera asimétrica generada (S1.2). (b) Detalle de la salida de gas de la boquilla y sus vectores de velocidad. (c) Vista en 3D de la atmósfera de protección asimétrica.

V.4.2. Influencia de una atmósfera protectora no simétrica en la concentración de polvo (S2)

Asumiendo que la capacidad de inyección de polvo de una boquilla coaxial depende de la fuerza de arrastre del gas para transportar las partículas de polvo, la introducción de un flujo de gas adicional para proteger la atmósfera puede afectar al flujo de gas portador y, en consecuencia, al comportamiento del flujo de las partículas. Así pues, el posible acoplamiento del flujo de gas

auxiliar con el flujo de gas portador debe estudiarse para comprender los efectos de las distintas configuraciones de protección. Para cuantificar esta influencia, se comparan los casos de flujo sin flujo de gas auxiliar (S2.0), flujo simétrico protector (S2.1) y boquilla protectora asimétrica (S2.2). En todos los casos, la distribución del polvo a la salida de la boquilla se mide utilizando herramientas de ponderación y adquisición óptica para un flujo de polvo típico de $5 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Los experimentos para la distribución del polvo se repiten seis veces para garantizar resultados reproducibles y se obtiene una desviación estándar media de 0,06.

Siguiendo el procedimiento descrito, se comparan las mediciones experimentales con las predichas por el modelo CFD. Como puede observarse, la influencia del flujo de gas auxiliar es mínima, y tanto la distancia de separación como la distribución del polvo en el plano focal se mantienen prácticamente constantes. En la Figura V.8 se muestra la comparación entre los resultados proporcionados por la simulación CFD y las mediciones experimentales discretas en el plano focal.

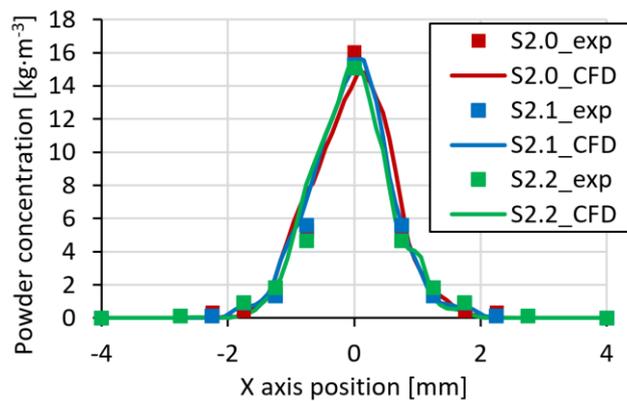


Figura V.8. Comparativa entre las medidas discretas de concentración de polvo y las obtenidas mediante el modelo de CFD.

En la Figura V.9. (a), se muestra una imagen de alta resolución del polvo a la salida de la boquilla, con la correspondiente imagen tratada con el software de Matlab. La imagen en escala de grises es cualitativa, donde los colores blanco y negro representan las concentraciones de polvo máxima y nula, respectivamente. Las imágenes obtenidas muestran un gran parecido con los resultados proporcionados por el modelo CFD, Figura V.9. (b). Por otro lado, en la Figura V.9. (c) se representa la concentración de polvo a lo largo del eje OZ para las diferentes configuraciones analizadas. El uso de una atmósfera protectora apenas modifica el perfil de concentración de polvo y la posición máxima, es decir, la ubicación del plano focal se mantiene a 15 mm de la punta de la boquilla en todos los casos.

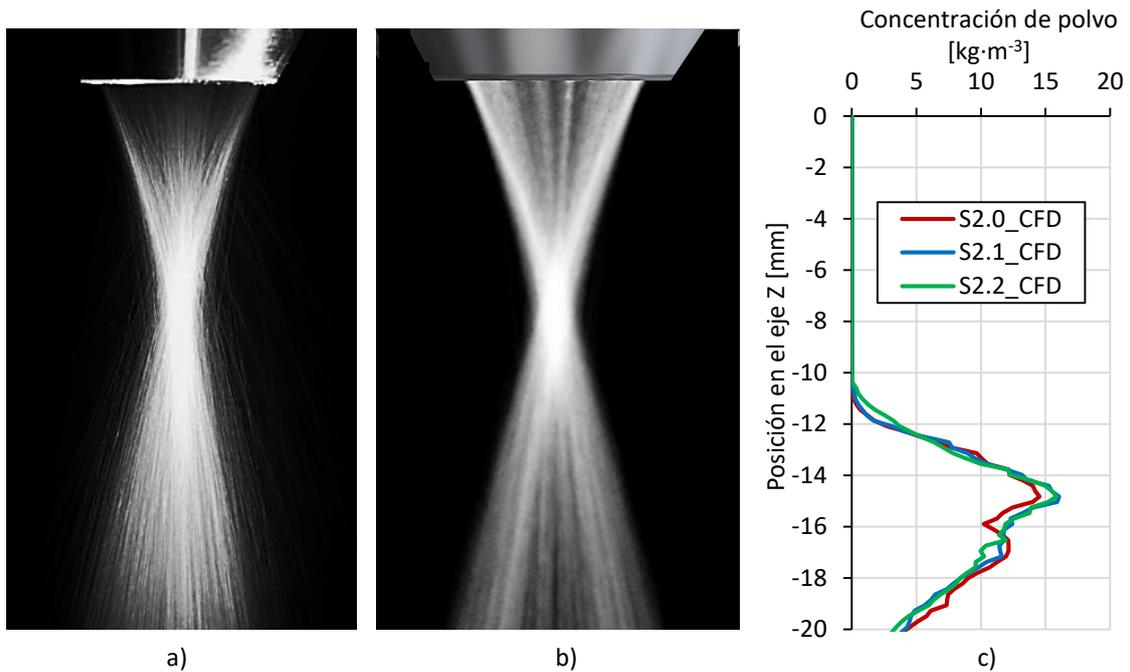


Figura V.9. (a) Fotografía obtenida experimentalmente de la salida de polvo en la boquilla. (b) Resultado del modelo de CFD. (c) Concentración de polvo a lo largo del eje OZ.

Los casos S2.1 y S2.2 presentan una concentración de polvo un 5 % superior a la del S2.0 en el plano focal, pero, como se muestra en la Figura V.8, el diámetro de flujo del polvo se mantiene. Como resultado de este análisis, puede concluirse que la influencia de las configuraciones de boquilla estudiadas en las trayectorias de las partículas de polvo es mínima.

V.4.3. Influencia de la velocidad de avance de la máquina en la eficiencia del proceso (S3)

Una vez validadas las simulaciones CFD con los resultados obtenidos en los estudios S1 y S2, se utiliza el mismo modelo para analizar el comportamiento de la boquilla a diferentes velocidades de avance. Para ello, se estudia la influencia de la velocidad de avance de la máquina sobre el flujo de gas protector y la distribución del polvo a la salida de la boquilla y como afecta ésta al rendimiento másico del proceso DED-LB.

Para analizar los resultados, se considera un área de baño de fusión de 1,75 mm de diámetro alrededor del eje de la boquilla, representada por un semicírculo rojo en la Figura V.10. Se considera, que las partículas de polvo que caen dentro de esta zona quedan atrapadas en el proceso aporte de material, mientras que se supone que el resto rebota en la superficie sólida del sustrato.

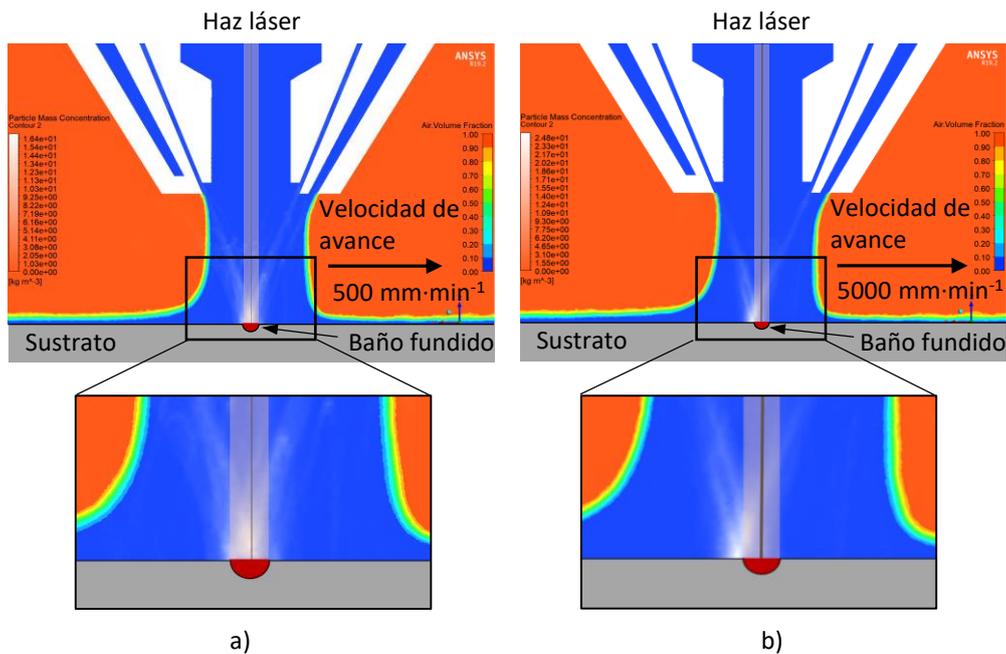


Figura V.10. Haz láser representado por línea vertical de color rojo, junto con atmósfera protectora asimétrica y distribución de polvo a diferentes velocidades. (a) $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. (b) $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

En la Figura V.10, se muestra una comparación entre dos velocidades de avance diferentes de a) $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ y b) $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ en el plano XZ (situado en $Y = 0 \text{ mm}$). Como puede observarse, la velocidad de avance tiene un impacto significativo en el flujo de polvo y su concentración, y produce un efecto de retraso en la corriente de polvo con respecto al eje de la boquilla. Por lo tanto, para cuantificar más detalladamente esta influencia, se varía la velocidad de avance de la máquina de 500 a $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, y se calcula la eficiencia másica para cada situación (Figura V.11). Como puede observarse, el rendimiento másico disminuye al aumentar el avance. Se establece una tendencia cuadrática con un R^2 de $0,9955$ y, por encima de $2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, se observa que el rendimiento másico disminuye significativamente.

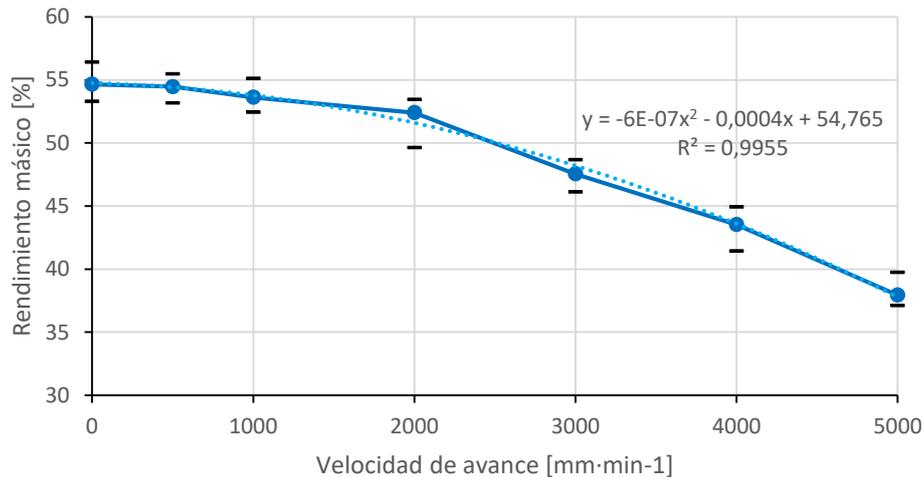


Figura V.11. Variación del rendimiento másico acorde al aumento de la velocidad de avance.

V.4.4. Influencia de la velocidad de avance en la concentración de oxígeno (S4)

Como se ha mencionado anteriormente, los materiales reactivos como las aleaciones de titanio tienden a oxidarse en presencia de oxígeno. Por lo tanto, es necesario mantener una atmósfera protectora eficaz hasta que la temperatura descienda por debajo de un determinado valor; 700 K (427 °C) para el caso del Ti6Al4V. Para ello, en S4 se estudia la influencia de la velocidad de avance en la concentración de oxígeno. Manteniendo constantes los valores de 14,6 J·m⁻¹ y 6,3 g·m⁻¹ correspondientes a la energía y al caudal másico por unidad de longitud, respectivamente; se han depositado sucesivos cordones a medida que se incrementa la velocidad de avance del cabezal de DED-LB desde 500 mm·min⁻¹ hasta 5000 mm·min⁻¹ en saltos de 500 mm·min⁻¹. En cada ensayo, la evolución de la temperatura en el cordón se mide experimentalmente mediante un pirómetro de dos colores enfocado en una zona fija de la trayectoria. Esta configuración permite medir el ciclo de calentamiento y enfriamiento de un solo punto, como se muestra en la Figura V.12. La referencia de la escala de tiempo se establece en el centro del haz láser, donde los valores de tiempo negativos representan el tiempo que falta para que el láser alcance esa posición y los valores positivos muestran el tiempo transcurrido desde que el centro del haz láser ha cruzado ese punto. Teniendo en cuenta que la atmósfera protectora tiene que proteger toda la región por encima de 700 K (427 °C), esto implica que para una velocidad de avance de 800 mm·min⁻¹, la atmósfera protectora tiene que proteger el titanio caliente durante más de 0,24 segundos.

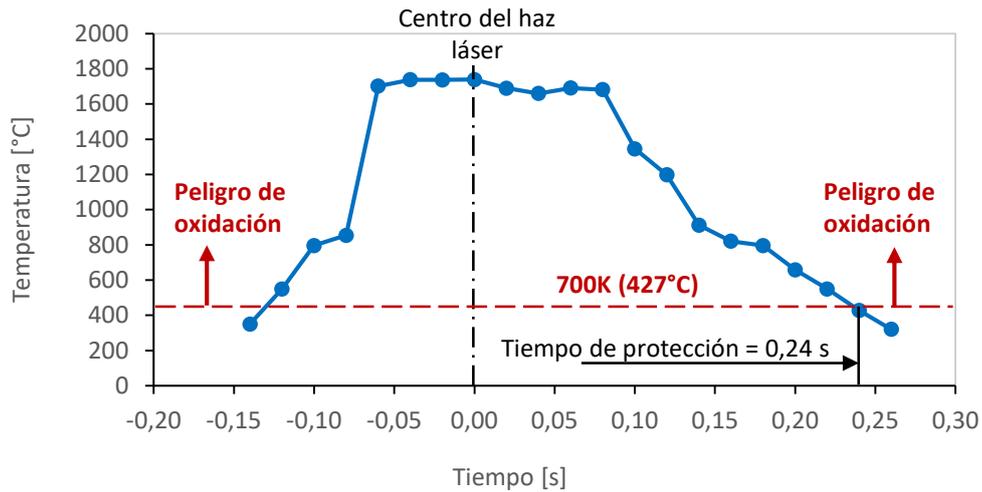


Figura V.12. Evolución de la temperatura de un punto fijo de un cordón de aporte, con respecto al centro del haz láser. (700 W de potencia láser, 800 mm·min⁻¹ de velocidad de avance, y 5 g·min⁻¹ de flujo másico de polvo)

Del mismo modo y para el rango de velocidades de avance estudiado, se determina el tiempo de protección tras el paso del haz láser por un determinado punto. Los valores obtenidos se representan en la Figura V.13. (a) con la etiqueta "tiempo para alcanzar 700 K", junto con el tiempo de protección que ofrece cada configuración de boquillas: S4.0 para el caso sin gas auxiliar, S4.1 para la boquilla con protección total simétrica y S4.2 para la boquilla con protección asimétrica. En la Figura V.13. (b), se muestra la concentración de oxígeno durante el proceso para una velocidad de avance de 2000 mm·min⁻¹. Como puede observarse, la boquilla sin flujo de gas auxiliar no es capaz de generar la atmósfera inerte necesaria y el material calentado se oxidaría. Por el contrario, la boquilla no simétrica protege el revestimiento casi tan bien como la configuración de protección total, pero con una reducción considerable del consumo de gas argón. Los resultados de la simulación de la boquilla no simétrica a una velocidad de avance de 2000 mm·min⁻¹ se representan en la Figura V.13. (c). Obsérvese que se establece un valor umbral de 50 ppm de la concentración de oxígeno para evitar la oxidación.

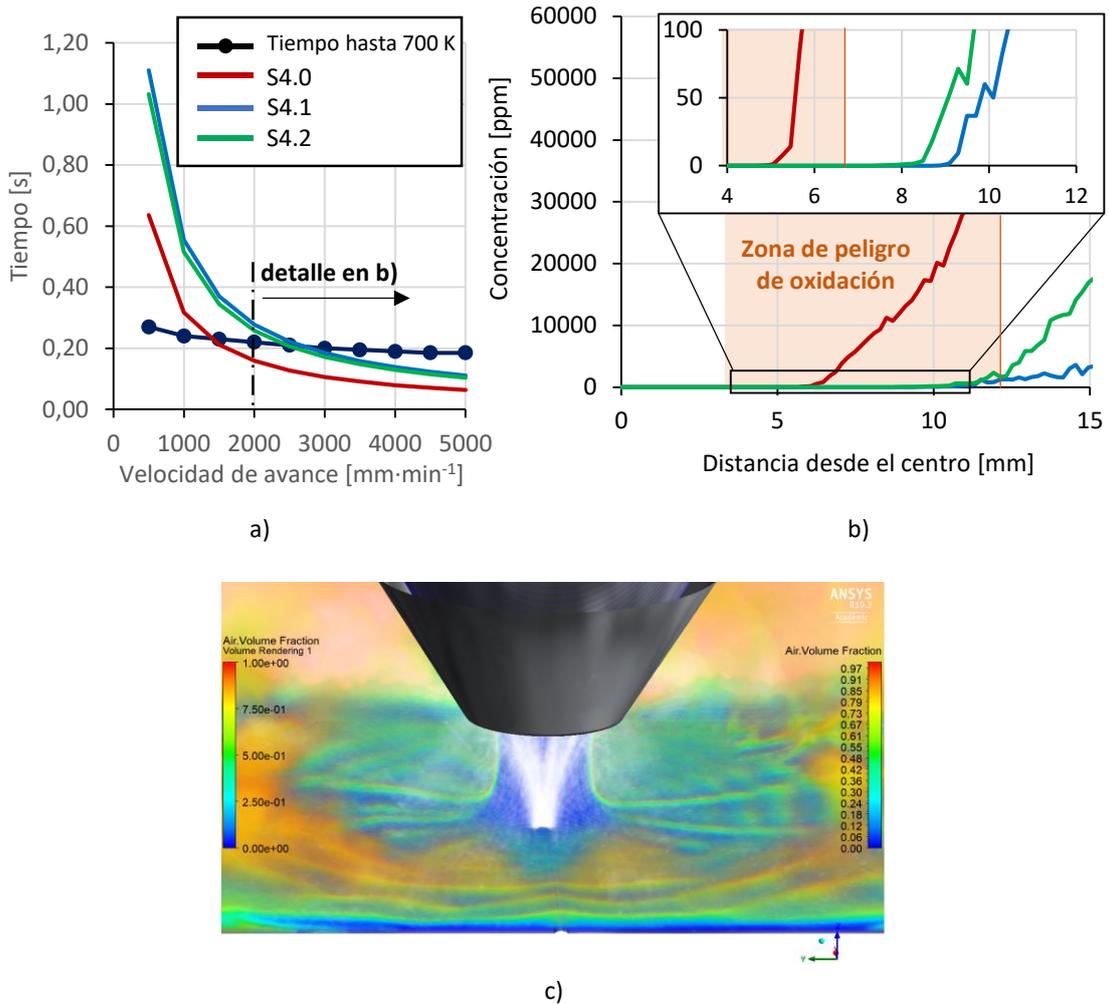


Figura V.13. (a) Comparación entre el tiempo que un material caliente necesita ser protegido y el tiempo de protección que ofrece la boquilla según su configuración. (b) Longitud del cordón protegida para una velocidad de avance de 2000 mm·min⁻¹. (c) Resultados de la simulación de S4.2 para 2000 mm·min⁻¹.

En la Tabla V.3 se detallan las velocidades de avance máximas permitidas para cada configuración de boquilla, así como el aumento de la eficiencia en comparación con la situación sin gas auxiliar. Puede observarse que el uso de una atmósfera protectora local aumenta considerablemente la productividad del proceso, ya que pueden alcanzarse mayores velocidades de avance sin oxidar el material depositado. Por un lado, la configuración totalmente protectora presenta una mejora del 74 % con respecto a la configuración sin gas auxiliar. Mientras que, la configuración no simétrica presenta una mejora del 62 %, aunque con un consumo muy inferior de argón, de tan solo una cuarta parte.

Tabla V.3. Velocidad máxima de avance para evitar la oxidación y su correspondiente incremento en productividad comparado con el rendimiento de la configuración sin gas auxiliar.

	Velocidad máxima de avance [mm·min ⁻¹]	Incremento de productividad [%]
S4.0	1325.0	0.00
S4.1	2312.5	74.53
S4.2	2150.0	62.26

V.5. Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología basada en simulaciones CFD para estudiar el comportamiento de boquillas DED-LB para la deposición de materiales altamente reactivos, como es el caso del Ti6Al4V. El uso de boquillas no simétricas genera una sobrepresión en el lado por el que se introduce el flujo de argón, lo que se traduce en una mejora de la atmósfera protectora en el lado opuesto. El rendimiento de la boquilla no simétrica se ha estudiado tanto experimental como numéricamente y se ha comparado con dos variantes: una solución convencional en la que no se utiliza gas auxiliar y la boquilla de protección total. Además, se han estudiado los dos principales factores que limitan la velocidad de avance durante la deposición de materiales reactivos: la eficiencia del caudal másico del proceso DED-LB y la oxidación del aporte. Las principales conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- La configuración de boquillas no simétricas propuesta ha demostrado su eficacia. La solución desarrollada ofrece una atmósfera altamente protectora durante el proceso de DED-LB, ya que se comporta de forma similar a la boquilla de protección total, pero con un consumo de gas inferior, con el correspondiente menor impacto medioambiental y ahorro económico.
- Se ha estudiado la influencia de la velocidad de avance del proceso en la eficiencia másica del proceso DED-LB. A medida que aumenta la velocidad de avance, disminuye la eficiencia del polvo capturado en el proceso. Para los casos estudiados, el rendimiento másico disminuye lentamente para velocidades de avance bajas y cae rápidamente a medida que éstas alcanzan los 2000 mm·min⁻¹. Para velocidades de avance inferiores al mencionado, la pérdida de eficiencia es inferior al 5 %.
- La oxidación del material depositado también limita la velocidad máxima a la que puede trabajar un cabezal de DED-LB. Se ha demostrado que el uso de boquillas protectoras aumenta la velocidad de avance máxima permitida hasta un 74 %, en comparación con el caso sin gas auxiliar. El uso de boquillas no simétricas ofrece un aumento de la

velocidad de avance del 62 %, permitiendo velocidades de avance de hasta 2150 mm·min⁻¹.

- El uso de boquillas no simétricas reduce la direccionalidad del proceso DED-LB ya que la zona protegida presenta una dirección dominante, opuesta al lado donde se inyecta el gas. Este fenómeno puede considerarse poco importante para procesos altamente direccionales como la fabricación aditiva de piezas de revolución. Sin embargo, podría ser muy importante para la fabricación de piezas de forma libre, donde se requiere un proceso DED-LB multieje.
- Las medidas de temperatura realizadas en el estudio S4 cubrían la situación de una única capa sobre un sustrato plano. Sin embargo, cuando se depositan capas sucesivas, la temperatura del sustrato aumenta y, en consecuencia, la zona calentada que debe protegerse sería mayor. Con el fin de determinar la velocidad de avance máxima admisible para cada situación, la metodología desarrollada en el presente trabajo de investigación debería aplicarse para las condiciones particulares de cada escenario específico.
- Se ha validado con éxito la idoneidad de las herramientas CFD para la simulación de boquillas de DED-LB. El modelo numérico se aproxima con precisión a las mediciones experimentales del proceso en lo que respecta a la concentración de oxígeno y polvo a la salida de la boquilla. Por lo tanto, el modelo desarrollado puede ser utilizado en futuros trabajos para el estudio de otras configuraciones de boquillas o condiciones de trabajo.

CAPÍTULO VI. Análisis de la influencia del helio en los procesos de
DED-LB con aleaciones de base Ni y base Ti

CAPÍTULO VI. Análisis de la influencia del helio en los procesos de DED-LB con aleaciones de base Ni y base Ti.

El objetivo del presente capítulo es evaluar el efecto de la mezcla de argón y helio en el proceso DED-LB mediante el análisis de cordones individuales de las aleaciones de base Ni, Inconel 718, y titanio, Ti6Al4V. Se miden la altura, anchura y profundidad de los recubrimientos, junto con la temperatura del proceso, para las diferentes mezclas de gases empleadas.

VI.1. Descripción de la metodología empleada

Para la realización de los ensayos se han seleccionado dos materiales diferentes que se emplean ampliamente en la industria aeronáutica. Una de ellas es la superaleación en base níquel, Inconel 718. Material que se emplea en la fabricación de componentes para turbinas y otras estructuras en las que las temperaturas pueden ser superiores a los 600 °C. Mientras que el otro material es la aleación de titanio, Ti6Al4V, cuya utilidad en los componentes aeronáuticos va ligada a la reducción de peso y se emplea justamente en situaciones opuestas a la primera, donde las temperaturas no sean un problema, pero se requiera una buena relación entre esfuerzo y peso del componente.

Los materiales empleados en estos experimentos, así como la descripción de la célula láser de aporte vienen descritos en el CAPÍTULO III. En este se ofrece la composición química de los materiales de aporte y sustrato, y la distribución de tamaños de partículas. A su vez, se adjuntan descripciones de los equipos empleados para los aportes de material y la monitorización de la temperatura. De la misma forma se recuerda que la nomenclatura para designar las diferentes mezclas de gases que se emplean en los ensayos de este capítulo es: Ar o argón puro, con una pureza de 99.998 %, Ar+He25, para una mezcla de argón con un 25 % de helio, y, por último, Ar+He50, para una mezcla de argón con un 50 % de helio.

Con el fin de realizar los estudios propuestos en este capítulo, se diseñan dos experimentos diferentes. Uno tiene como objetivo medir la temperatura de la zona de fusión y su tiempo de enfriamiento. Y el segundo pretende caracterizar los cordones depositados midiendo su altura, anchura, profundidad de dilución y ángulo de contacto, junto con la temperatura del proceso.

VI.2. Medición de la temperatura del baño de fusión y tiempo de enfriamiento

El experimento consiste en incidir, durante un segundo, con el haz láser sobre la superficie limpia del sustrato de cada material, y con una potencia de 250 W. La lectura de las temperaturas comienza desde el momento en que el haz láser incide sobre la superficie del sustrato. Una vez

apagada la potencia del láser, la medición de la temperatura continua hasta que el pirómetro deja de registrar cualquier intensidad de señal procedente del sustrato. El tiempo entre mediciones se fija en 16 ms. Se ensayan cuatro repeticiones en la medición de temperatura para cada una de las tres mezclas de gases (Ar, Ar+He25 y Ar+He50). La Figura VI.1 muestra los resultados de las mediciones, en las que debe tenerse en cuenta el valor mínimo del rango de temperatura del pirómetro que se sitúa en los 823 K. Para futuras consideraciones, el valor máximo de temperatura que registra el pirómetro es de 2773 K.

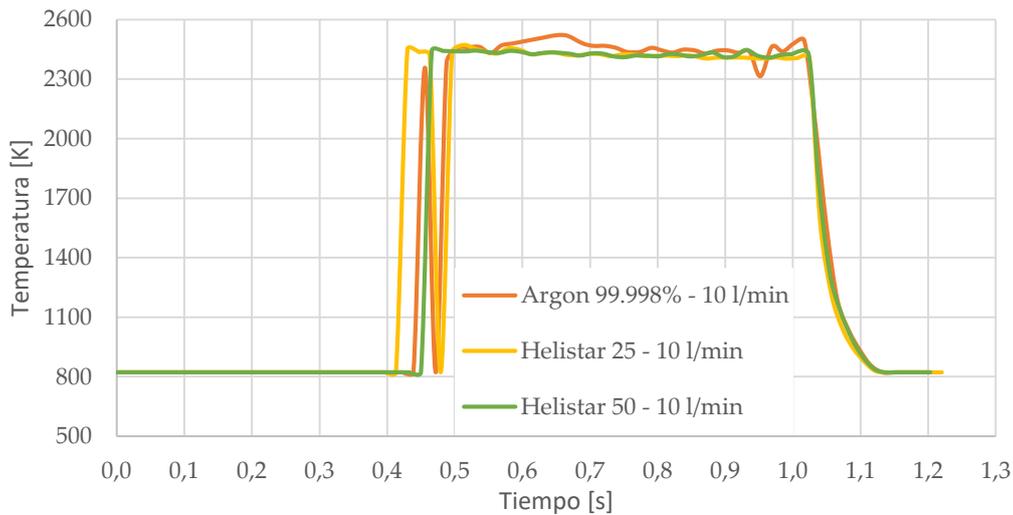


Figura VI.1. Medidas de temperatura del encendido y apagado del láser con las tres mezclas de gases.

En todos los casos, el valor medio alcanzado por el material base es de 2420 K (2147 °C), cuando ha transcurrido un segundo, lo que indica que se supera la temperatura de fusión con creces incluso con el empleo de tan baja potencia. La temperatura alcanza el mínimo registrable por el pirómetro en aproximadamente 130 ms de media, para todos los ensayos (Ar, Ar+He25, y Ar+He50). El resultado de este experimento implica que la temperatura del material no varía de manera notable con la influencia de las distintas mezclas de gases, ni tampoco muestra diferencias en los enfriamientos, siempre considerando la baja tasa de energía aportada en estos casos.

VI.3. Experimentos de deposición de metales por láser

Antes de emplear las distintas mezclas de gases que contienen helio, se realizan ensayos para determinar los parámetros óptimos para el aporte de los dos materiales. Estos ensayos se realizan empleando solamente argón como gas de arrastre y protección. Los parámetros se seleccionan a partir de trabajos anteriores y se itera sobre ellos hasta conseguir aportes sin grietas ni porosidad. Dichos parámetros se muestran en la Tabla VI.1 y son los utilizados como valores de referencia para los ensayos con las mezclas de gases que contienen helio. Además, y

en vista de que el parámetro más relevante para estos experimentos es la potencia láser, se propone variar la potencia de los parámetros óptimos unos 200 W para analizar su comportamiento. Esto se debe a que el haz láser podría verse ocluido por su interacción con la mezcla de gases. Los resúmenes de los parámetros de ensayo se presentan en la Tabla VI.2 y Tabla VI.3.

Tabla VI.1. Parámetros de referencia para el aporte de Inconel 718 y Ti6Al4V.

Material	Potencia láser [W]	Velocidad de avance [mm·min ⁻¹]	Diámetro del haz [mm]	Caudal másico [g·min ⁻¹]	Flujo de gas protector [l·min ⁻¹]	Flujo de gas portador [l·min ⁻¹]	Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]
Inconel 718	600	500	1,60	8,00	12,00	4,50	0,00
Ti6Al4V	700	800	1,60	3,00	15,00	4,50	10,00

Tabla VI.2. Resumen de los parámetros para los ensayos de Inconel 718.

Referencia	Potencia láser [W]	Velocidad de avance [mm·min ⁻¹]	Diámetro del haz [mm]	Caudal másico [g·min ⁻¹]	Flujo de gas protector [l·min ⁻¹]	Flujo de gas portador [l·min ⁻¹]	Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]
Inconel 718							
1#	400						
2#	600	500	1,60	8,00	12,00	4,50	0,00
3#	800						

Tabla VI.3. Resumen de parámetros para los ensayos de Ti6Al4V y diferentes caudales de gas auxiliar.

Referencia	Potencia láser [W]	Velocidad de avance [mm·min ⁻¹]	Diámetro del haz [mm]	Caudal másico [g·min ⁻¹]	Flujo de gas protector [l·min ⁻¹]	Flujo de gas portador [l·min ⁻¹]	Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]
Ti6Al4V							
01#	500						
02#	700						0,00
03#	900						
11#	500						
12#	700	800	1,60	3,00	15,00	4,50	10,00
13#	900						
21#	500						
22#	700						20,00
23#	900						

Los ensayos se realizan, tanto con argón puro como con las dos mezclas de gases, con un 25 % y un 50 % de concentración de helio, respectivamente. La medida de la temperatura se realiza siguiendo el haz láser, de forma que el pirómetro coincide en todo momento con el baño de fundido. Una vez finalizadas las pruebas experimentales, se obtienen secciones transversales de los cordones, que se cortan y analizan para obtener la caracterización. Se realizan varios cortes

por cordón y se miden cuatro parámetros principales, que incluyen la altura, la anchura, la profundidad de dilución y el ángulo de contacto [Toyserkani et al. 2004], [Bennett et al. 2017].

VI.4. Ensayos realizados con Inconel 718

La Tabla VI.4 muestra que, para un mismo valor de densidad de energía, el ancho, la profundidad de dilución y la altura de los cordones disminuyen a medida que aumenta la concentración de helio. El ángulo de contacto también presenta diferencias entre las pruebas, aunque la mayor variación se observa para el caso de Ar+He50. La Figura VI.2 acompaña a los resultados, a modo de ejemplo de las secciones transversales analizadas.

Tabla VI.4. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 400 W. Entre paréntesis se encuentra la desviación estándar de la medida.

Mezcla de gases	Altura [mm]	Ancho [mm]	Profundidad [mm]	Ángulo de contacto [°]
Ar	0,69 (0,040)	1,15 (0,018)	0,16 (0,013)	89 (1,0)
Ar+He25	0,63 (0,020)	1,10 (0,014)	0,13 (0,023)	88 (1,5)
Ar+He50	0,60 (0,029)	1,06 (0,009)	0,10 (0,009)	78 (1,0)

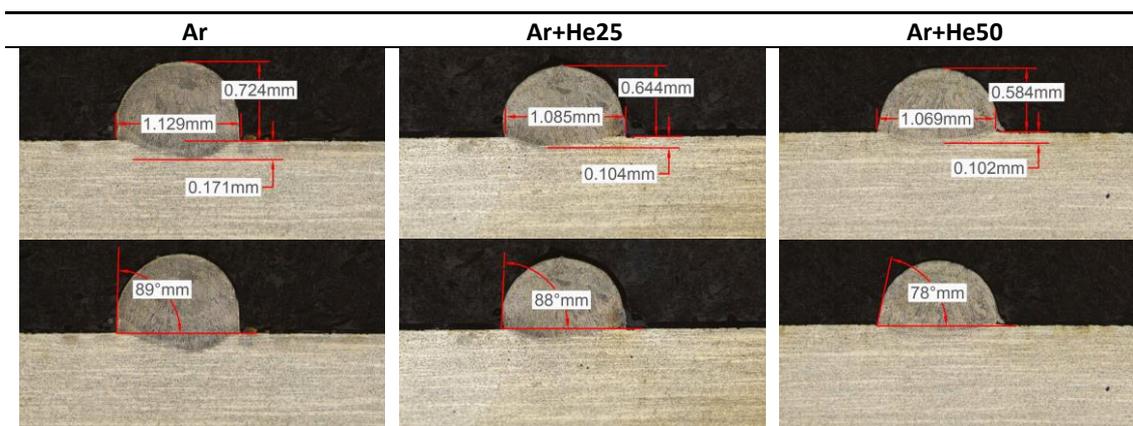


Figura VI.2. Secciones transversales de los cordones de aporte a 400 W, para Inconel 718

Siguiendo con la misma metodología, en la Tabla VI.5 se presentan los ensayos con una potencia láser de 600 W. En comparación con los ensayos realizados a 400 W, se observan incrementos significativos en el ancho de los cordones, debido a la mayor potencia, pero no en la altura, que dependen principalmente del flujo másico de polvo. La Figura VI.3 muestra, al igual que para 400 W, los resultados a modo de ejemplo de las secciones transversales analizadas.

Para esta potencia láser de 600 W, el ancho de los diferentes cordones de aporte apenas varía entre las mezclas de gases, así como la profundidad de dilución del material. Sin embargo, la variación de la altura como resultado del uso de diferentes gases es más significativa y, de nuevo, se observa una mayor variación para las pruebas de mayor concentración de helio (Ar+He50).

Tabla VI.5. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 600 W. Entre paréntesis se encuentra la desviación estándar de la medida.

Mezcla de gases	Altura [mm]	Ancho [mm]	Profundidad [mm]	Ángulo de contacto [°]
Ar	0,75 (0,009)	1,48 (0,015)	0,18 (0,004)	81 (1,2)
Ar+He25	0,70 (0,016)	1,49 (0,009)	0,17 (0,008)	73 (1,0)
Ar+He50	0,66 (0,009)	1,51 (0,010)	0,15 (0,009)	60 (0,8)

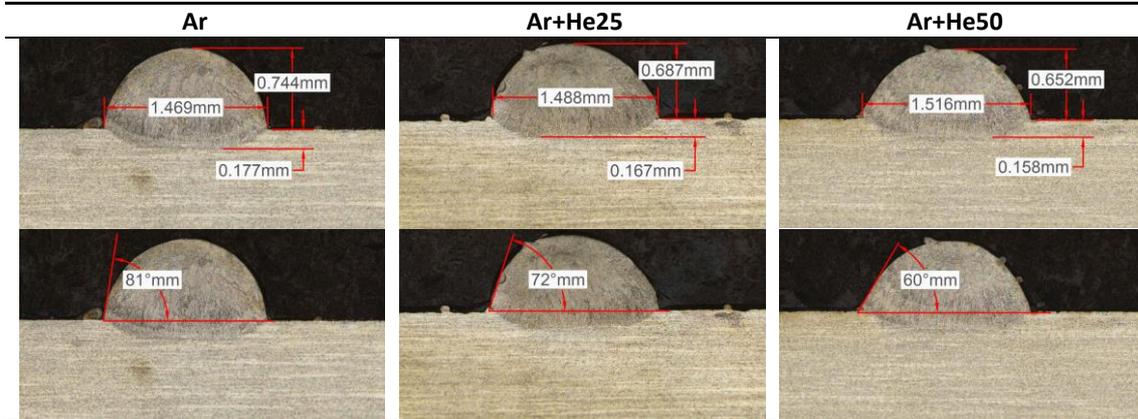


Figura VI.3. Secciones transversales de los cordones de aporte a 600 W, para Inconel 718

La Tabla VI.5 muestra también una reducción de los ángulos de contacto de los cordones debido a la mayor potencia del láser. Sin embargo, también se observan diferencias significativas en el ángulo de contacto con cada mezcla de gases. Cuanto mayor es la concentración de helio, menor es el ángulo del cordón de recubrimiento. Las secciones transversales de los ensayos a 800 W se muestran en la Figura VI.4.

Por último, en la Tabla VI.6 se muestran los resultados de los ensayos con una potencia láser de 800 W. Debido al incremento de potencia, la anchura y la dilución son superiores a las obtenidas en los ensayos de 400 W y 600 W.

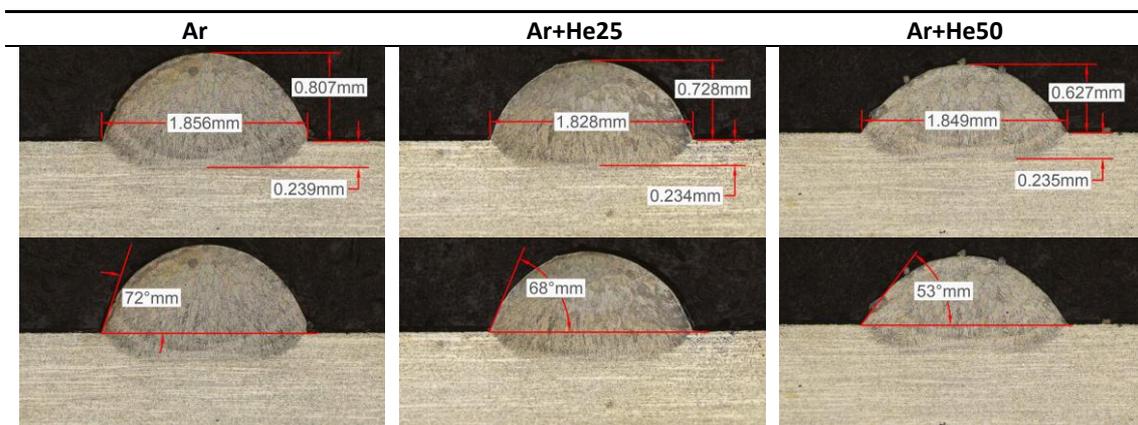


Figura VI.4. Secciones transversales de los cordones de aporte a 800 W, para Inconel 718

Tabla VI.6. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 600 W. Entre paréntesis se encuentra la desviación estándar de la medida.

Mezcla de gases	Altura [mm]	Ancho [mm]	Profundidad [mm]	Ángulo de contacto [°]
Ar	0,79 (0,014)	1,87 (0,013)	0,25 (0,010)	73 (1,0)
Ar+He25	0,73 (0,009)	1,82 (0,015)	0,26 (0,008)	67 (1,2)
Ar+He50	0,65 (0,020)	1,84 (0,010)	0,23 (0,006)	53 (0,8)

Al igual que en los experimentos anteriores, la mayor variación entre los ensayos se produce en la altura, mientras que la profundidad de dilución y la anchura permanecen casi invariables. El aumento de la potencia del láser produce un ángulo de contacto menor que en los ensayos anteriores. Además, el ángulo de contacto cambia para las diferentes composiciones de gas (Tabla VI.6), tal y como lo hacía en ensayos anteriores. De todas las características, la reducción del ángulo de contacto es la variación más significativa al utilizar diferentes mezclas, mientras que el resto de las mediciones presentan valores similares. Además del análisis geométrico, se monitoriza la temperatura durante el proceso mediante pirometría y la Figura VI.5 muestra los resultados de estas mediciones.

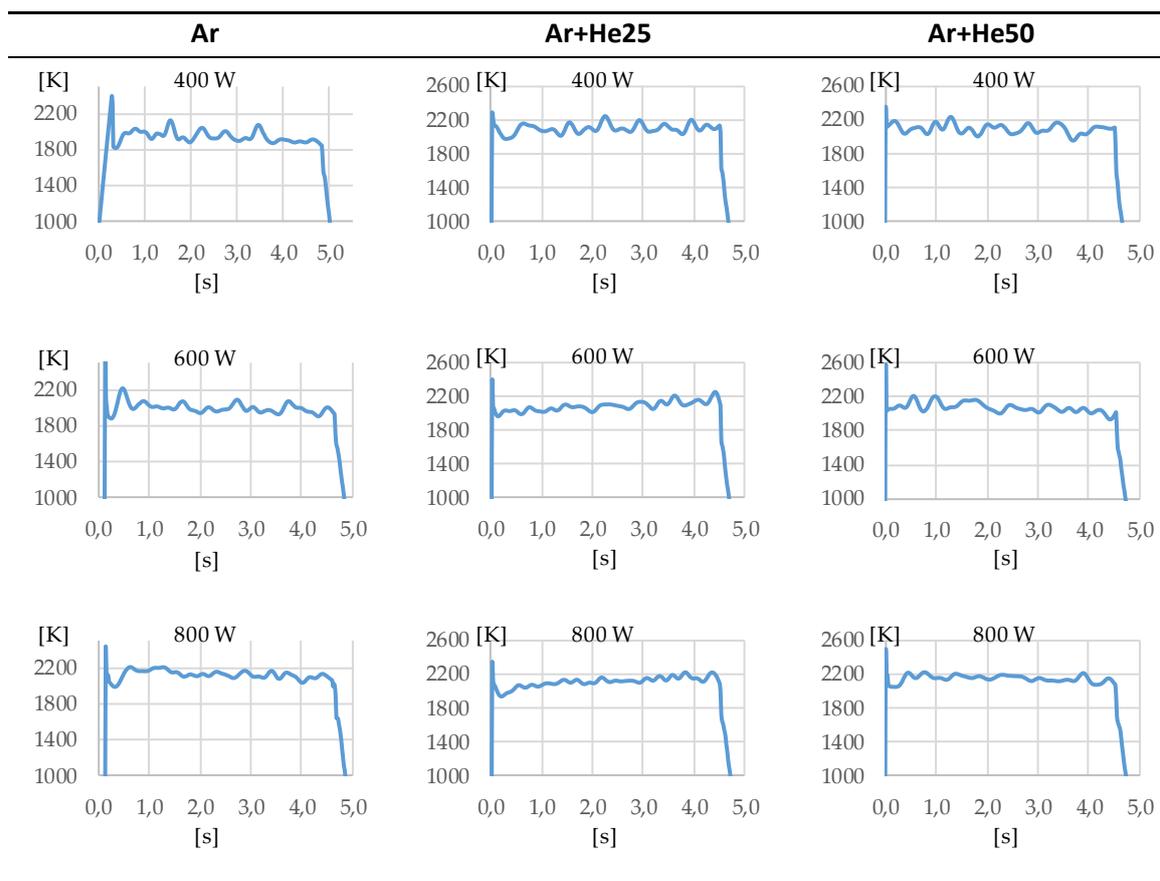


Figura VI.5. Medidas de las temperaturas para cada mezcla de gas y potencia ensayadas.

En todos los casos, la utilización de helio en el proceso da lugar a temperaturas más elevadas. Cuando se utiliza Ar puro, se alcanzan temperaturas medias de 1938 K, 1991 K y 2121 K para potencias láser de 400 W, 600 W y 800 W, respectivamente. Sin embargo, cuando se emplea Ar+He25 y Ar+He50 a 400 W, se miden temperaturas con valores medios de 2093 K y 2097 K, respectivamente. El aumento de la cantidad de helio en la mezcla no da lugar a incrementos en la temperatura.

Como se ha observado en los ensayos, el contenido de helio del gas afecta a la geometría del cordón depositado. La comparación entre los ensayos realizados con Ar y los realizados con Ar+He50, muestra diferencias en sus valores de altura de 70 μm , 90 μm y 140 μm para valores de potencia láser de 400 W, 600 W y 800 W, respectivamente. Estas variaciones de altura son ligeramente inferiores cuando se utiliza Ar+He25. En cuanto a los valores de ancho y profundidad, las diferencias no superan los 30 μm para la profundidad de dilución y los 50 μm para la anchura, y no se aprecia ninguna tendencia clara. Por otra parte, el ángulo de contacto parece tener una correlación con la concentración de helio en la mezcla de gas, cambiando la forma de la geometría del recubrimiento al suavizar la pendiente. El ángulo de contacto disminuye al aumentar la proporción de helio y se registran valores de variación de hasta 21 grados.

La variación de la temperatura de la zona de fusión es otro factor muy afectado por la mezcla de gases. Con argón, se registraron variaciones de casi 200 K para un incremento de la potencia láser de 400 W a 800 W. Sin embargo, las mismas diferencias de potencia láser no muestran variaciones significativas de la temperatura cuando se utilizan gases con presencia de helio, con tan sólo de 20 K de diferencia, aproximadamente.

Como afirman Andreas Patschger y Rolf Wester et al. [Patschgera et al. 2011], [Wester, 2011], la energía de ionización del gas es importante debido a la formación de plasma en la trayectoria del haz láser. En este caso, el argón es más susceptible de formar gas ionizado debido a su menor valor de energía de ionización, que se aproxima al 64% del helio. Además, la conductividad térmica de estos dos gases es muy diferente, siendo la del helio ($0,151 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) cerca de 40 veces superior a la del argón ($0,018 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

El plasma funciona como aislante del haz láser y las conductividades térmicas más elevadas permiten que el calor irradiado se devuelva al proceso. La variación de la temperatura para los distintos gases puede explicarse con estos dos fenómenos. Para un proceso de alta densidad energética, el uso de argón contribuye a la formación de plasma y, por tanto, al aislamiento de parte de la energía aportada por el láser. Por otro lado, el helio es capaz de trabajar con

densidades de energía más elevadas sin favorecer la formación de plasma y contribuyendo a realimentar calor al proceso debido a su mayor conductividad térmica.

VI.5. Ensayos realizados con Ti6Al4V

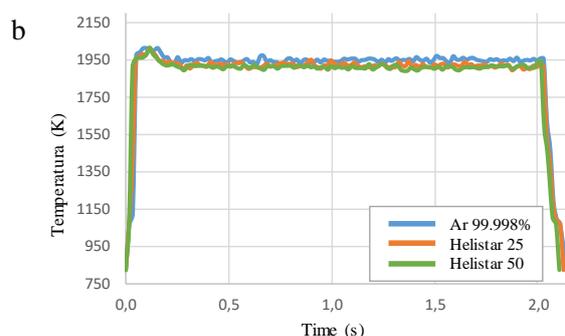
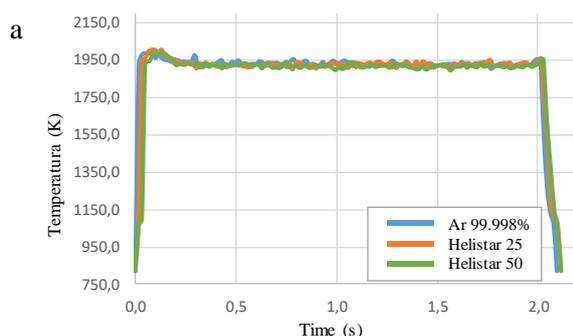
En cuanto a la aleación de titanio Ti6Al4V, se analiza la influencia de las mismas tres mezclas de gases diferentes, empleadas ahora también como flujo de gas de protección auxiliar en el proceso DED-LB para materiales reactivos. Al igual que en el caso del Inconel 718 se ensayan tres potencias diferentes, incluyendo la del cordón de referencia. Las tres potencias de láser distintas son 500 W, 700 W, y 900 W; y los tres flujos de gas auxiliar son 0 l·min⁻¹, 10 l·min⁻¹, 20 l·min⁻¹. Se procede de igual manera que con la aleación de Inconel 718, seccionando los cordones transversalmente y midiendo su morfología.

La variabilidad de los resultados se mide en términos de desviación media absoluta en torno al valor medio. Estas desviaciones medias toman valores inferiores a 30 μm para las mediciones de anchura, 20 μm para las de altura y 40 μm para las de las zonas afectadas térmicamente; las desviaciones de los ángulos húmedos se sitúan dentro de 1,5 grados.

En la Tabla VI.7 se encuentran los valores medios de las diferentes secciones transversales obtenidas de las repeticiones de las pruebas experimentales a 500 W. El análisis de la temperatura se realiza para los tres gases diferentes a la misma potencia y caudal de gas.

Tabla VI.7. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 500 W.

Mezcla de gases	Ar			Ar+He25			Ar+He50		
	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0
Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]									
Ancho [mm]	1.438	1.392	1.386	1.357	1.386	1.381	1.383	1.390	1.372
Alto [mm]	0.405	0.388	0.589	0.403	0.401	0.442	0.313	0.360	0.382
Profundidad [mm]	0.577	0.567	0.546	0.556	0.556	0.496	0.671	0.539	0.539
Ángulo de contacto [°]	49.0	49.5	48.5	47.0	45.0	46.5	37.0	40.0	40.0



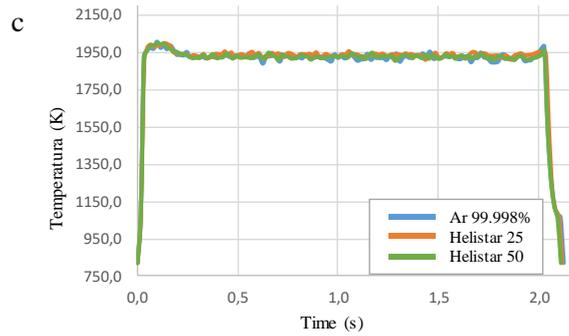


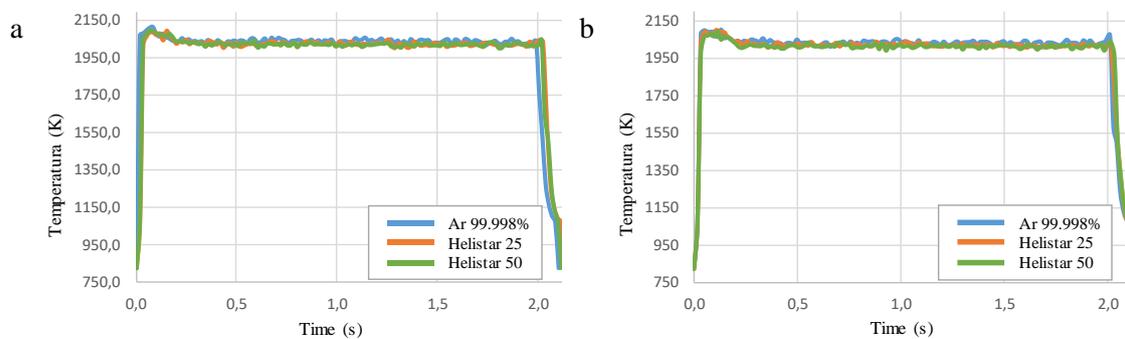
Figura VI.6. Medidas de la temperatura para cada mezcla de gases y potencia de láser de 500 W

Los resultados indican una variación prácticamente nula entre las características de los cordones llevados a cabo con distintos caudales y mezclas de gases. En todos los casos, la temperatura alcanza un valor medio de aproximadamente 1950 K, Figura VI.6.

Una vez más, las variaciones no son significativas para las características de los cordones a 700 W, tal y como puede observarse en la Tabla VI.8. Además, no se miden diferencias especiales entre temperaturas tampoco, para ninguna de las tres mezclas de gases utilizadas. La temperatura tampoco parece depender del caudal de gas. Los valores medios de la temperatura alcanzan 2020 K, Figura VI.7.

Tabla VI.8. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 700 W.

Mezcla de gases	Ar			Ar+He25			Ar+He50		
	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0
Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0
Ancho [mm]	1.729	1.743	1.720	1.741	1.803	1.753	1.746	1.767	1.801
Alto [mm]	0.468	0.487	0.488	0.502	0.442	0.556	0.454	0.480	0.484
Profundidad [mm]	0.726	0.719	0.704	0.710	0.696	0.644	0.735	0.696	0.671
Ángulo de contacto [°]	43.5	41.5	44.5	40.0	37.0	42.0	41.0	40.0	41.0



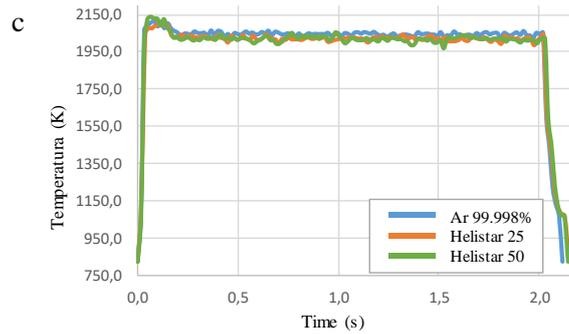
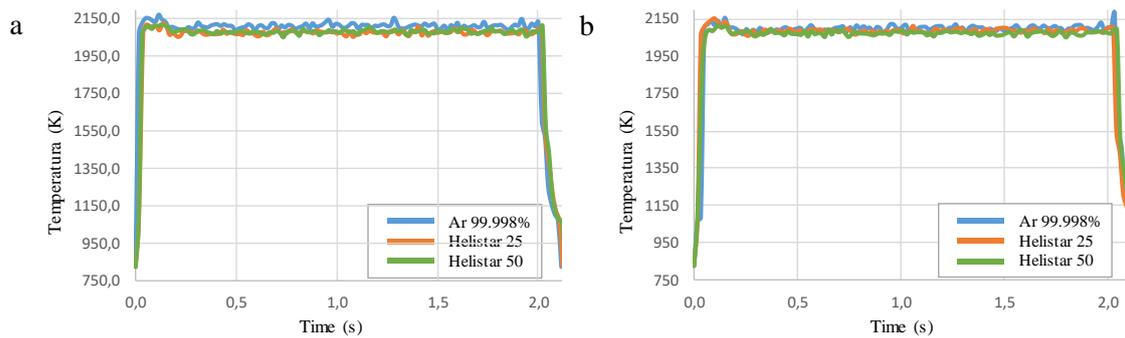


Figura VI.7. Medidas de la temperatura para cada mezcla de gases y potencia de láser de 700 W

Aunque existe una variación mínima en la altura y el ángulo de contacto con el incremento del flujo de gas, Tabla VI.9, es necesario aumentar la potencia del láser hasta 900 W para que pueda apreciarse. Una vez más los resultados para la temperatura también son similares para el uso de diferentes tipos de mezclas de gas y caudales. El valor medio de la temperatura es de 2080 K, Figura VI.8.

Tabla VI.9. Resultados de la caracterización de la sección transversal de los cordones realizados con cada mezcla y potencia láser de 900 W.

Mezcla de gases	Ar			Ar+He25			Ar+He50		
	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0
Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	20,0
Ancho [mm]	2.024	2.031	1.993	2.011	2.071	2.063	2.035	2.069	2.068
Alto [mm]	0.413	0.511	0.564	0.426	0.462	0.524	0.429	0.468	0.534
Profundidad [mm]	0.863	0.860	0.859	0.830	0.813	0.844	0.845	0.809	0.748
Ángulo de contacto [°]	30.0	36.0	39.5	34.5	36.0	40.0	32.0	35.5	38.5



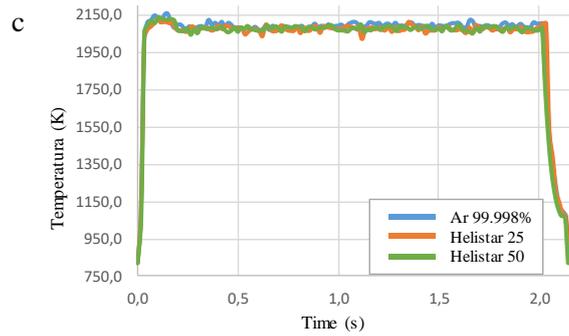


Figura VI.8. Medidas de la temperatura para cada mezcla de gases y potencia de láser de 900 W

Para las potencias de 500 W y 700 W, no se observan diferencias importantes en altura, ancho, penetración o ángulo de contacto para ninguna de las tres mezclas ni caudales de gas auxiliar. Sólo para la mayor potencia láser, 900 W, los resultados muestran una ligera diferencia para la altura y el ángulo de contacto, siendo estos últimos los cambios más significativos. El resto de las características de la geometría de los cordones permanecen prácticamente estables con una variación de unos pocos micrómetros para los casos extremos. Se observa que la variabilidad de estas características depende más de los caudales que de la composición de la mezcla de gases.

Por último, la temperatura también muestra independencia de la influencia de las mezclas de gases y su valor es mayor con un incremento de la potencia del láser, como suele ser habitual en el proceso de DED-LB.

Estos resultados pueden explicarse por la mínima energía específica requerida para alcanzar la pluma de plasma y su dependencia del material. Christian Kledwig et al. [Kledwig et al. 2019] describieron este fenómeno dando algunos valores de energía específica requerida, que están entre los $16 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ y los $30 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. En el caso concreto de estos estudios, las diferentes densidades de energía varían entre $23 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ y $42 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$, siendo el valor más alto es el que presenta variaciones.

VI.6. Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado la influencia de la composición de los gases y de la presencia del He en el proceso de DED-LB, para dos materiales distintos, Inconel 718 y Ti6Al4V. Se han ensayado tres mezclas con composiciones diferentes de gas: Ar con pureza del 99,998 %, Ar+He25 con argón al 75 % y helio al 25 %, y Ar+He50, con argón y helio a partes iguales.

Para la aleación de Inconel 718, se observa que cuanto mayor es la presencia de helio en la mezcla, menor es la altura de los cordones. El resto de las características geométricas

permanecen prácticamente estables con una variación inferior a los 60 μm en los casos más extremos.

La variación más significativa en la forma de los cordones es respecto a su ángulo de contacto. Este parámetro varía dentro de un amplio rango con la concentración de helio, disminuyendo su valor mientras la presencia de este gas va en aumento. Se observan variaciones de 10° a 20° entre el uso de argón puro y una mezcla con un 50 % de helio. Además, la temperatura del baño de fundido también se ve influida por la presencia del helio cuando se combina con altas densidades de energía.

Para el Inconel 718, las mezclas de gases que contengan helio y argón tienen efectos diferentes y su influencia no puede despreciarse.

Mientras tanto, para la aleación de Ti6Al4V, las mezclas de gases helio y argón apenas influyen sobre el proceso de DED-LB, siendo esta despreciable, más allá de los efectos que pudieran tener los caudales.

Uno de los pocos efectos que se consigue identificar en los ensayos con la aleación de titanio, es que el incremento del flujo de gas cambia el ángulo de contacto para el caso de una potencia láser de 900 W, aunque este efecto podría ser resultado de la creación de plasma en el paso del haz láser [Ruiz et al. 2018]. Por lo que la energía específica de $42 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ podría ser el límite requerido para la creación de una pluma de plasma. Aunque ese estudio está fuera del alcance del presente trabajo, pero los resultados muestran algunos cambios a esa densidad de energía.

CAPÍTULO VII. Proceso de DED-LB con inyección de polvo para la
fabricación de piezas aeronáuticas

CAPÍTULO VII. Proceso de DED-LB con inyección de polvo para la fabricación de piezas aeronáuticas.

Como se ha expresado en los capítulos anteriores, existe una necesidad por parte de las empresas especializadas en aeronáutica de crear procesos de fabricación y reparación que sean cada vez más versátiles y capaces de generar o reparar geometrías más complejas. Un proceso de reparación mediante DED LB requiere de una serie de pasos que serán descritos en los siguientes apartados, a medida que se aporta experiencia propia generada.

Los procesos de DED-LB se caracterizan por la cantidad de parámetros de entrada y la complejidad derivada de la interacción de los mismos y su sensibilidad a los cambios. Una fabricación o reparación exitosa, depende en gran medida de la parametrización previa realizada para el o los materiales a emplear. Es importante por tanto contar con una metodología para la obtención de dichos parámetros.

VII.1. Caracterización del material para el proceso de aporte mediante DED-LB

Antes de poder desarrollar una estrategia de reparación es necesario conocer los parámetros de entrada y las características del material a depositar. Para ello se realizan ensayos de caracterización que determinan el ancho, la altura, y la profundidad de los cordones de aporte, así como los parámetros de entrada, como son la velocidad de avance, la potencia láser, el caudal de polvo y los flujos de gases necesarios para generar dichas características.

En segundo lugar, se debe ensayar la superposición necesaria entre cordones que garanticen una capa de material homogénea sin poros ni grietas. Más tarde se obtiene la altura conseguida con el aporte de una capa sobre el sustrato y el incremento de cota entre capas subsiguientes.

Durante todo el proceso de caracterización y generación de capa homogénea se estudian, mediante cortes metalográfico, otras características importantes del material aportado, como el tamaño de los granos, su tipo de crecimiento la presencia de fases diferentes. Esta información no sólo puede ayudar a decidir qué parámetros son los óptimos para el aporte, sino incluso indicar si será necesario realizar algún tipo de tratamiento térmico posterior a la fabricación.

VII.2. Fabricación de un componente tipo Blisk mediante DED-LB

Se presenta en este estudio la fabricación y propuesta de reparación, empleando la misma estrategia, para un componente tipo blisk mediante el proceso aditivo de DED-LB.

Los procesos de caracterización y fabricación se llevan a cabo con el equipamiento de laboratorio mencionado en el CAPÍTULO III. El material de aporte empleado en este caso es un polvo metálico de Hastelloy X, cuya composición química viene detallada en la Tabla VII.1. El material es depositado sobre un disco de Inconel 718.

Tabla VII.1. Composición química del Hastelloy X (% en peso)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B	Nb	Al	Ti
47,0 (BAL)	22,0	18,0	9,0	1,5	0,6	0,1	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 0,008	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,15

La caracterización de los cordones aportados se realiza mediante un barrido de parámetros cuyos valores son previamente estudiados con la bibliografía existente sobre dichos materiales. Se propone una combinación de potencia, velocidad de avance y caudal másico de polvo, dejando los flujos de gas de arrastre y protección fijos. Finalmente, la caracterización se realiza variando la potencia láser desde los 400 W hasta los 700 W, con incrementos de 100 W. La velocidad de avance se establece en tres valores diferentes ($300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, y $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), de igual manera que los caudales de polvo ($3 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, $4 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, y $6 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$). En cuanto a los caudales de gas, se fijan en $4,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ para el flujo de arrastre y $15,0 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ para el flujo de protección.

Los criterios de selección para el cordón de aporte buscan maximizar la altura, siempre que esta sea inferior a un tercio del ancho del cordón, y que el ángulo de contacto sea inferior a 45° . Se descartan obviamente, cualquier cordón con defectos como grietas, poros, o falta de fusión.

De la caracterización de cordones destaca un conjunto de parámetros que ofrecen un resultado que puede observarse en la Figura VII.1, y que muestran un ancho de cordón de aproximadamente 1,85mm, y cuyos parámetros de entrada se resumen en la Tabla VII.2.

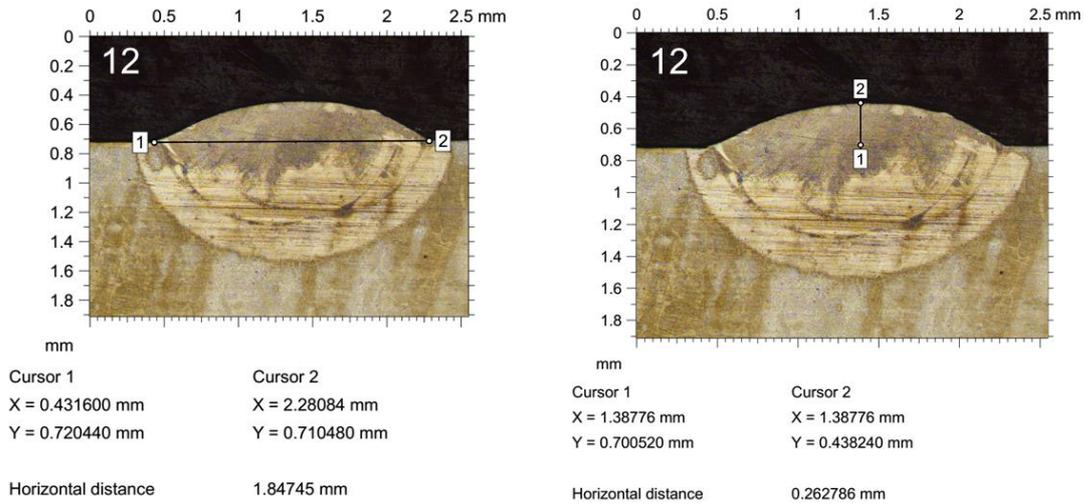


Figura VII.1. Corte metalográfico de corte transversal de un cordón de Hastelloy X.

Tabla VII.2. Parámetros de aporte mediante DED-LB para polvo metálico de Hastelloy X

Potencia láser [W]	Velocidad de avance [mm·min ⁻¹]	Diámetro del haz [mm]	Caudal másico [g·min ⁻¹]	Flujo de gas protector [l·min ⁻¹]	Flujo de gas portador [l·min ⁻¹]	Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]
600	300	1,6	3,0	15,0	4,5	0,0

Los ensayos para determinar la superposición entre cordones arrojan su mejor resultado para un valor del 40 % del ancho de los mismos, lo que resulta en una altura de capa de 0,5 mm aproximadamente.

La estrategia de fabricación se evalúa con las herramientas de CAM disponibles, entre las cuales destaca el módulo de creación propia para el software de Siemens, NX [González et al. 2017]. De las estrategias estudiadas, una de ellas ofrece el mejor acuerdo entre accesibilidad (libre de colisiones) y estabilidad del proceso.

Se propone realizar el aporte de cada álabe individualmente, realizando el crecimiento capa a capa. Dado que tras la caracterización se conoce la geometría de los cordones, se establece que solamente hacen falta dos cordones para generar el espesor, con las demás del mecanizado, para cada álabe. Es por ello, que se define una estrategia helicoidal alabeada para la generación de la geometría. De esta manera se consiguen evitar paradas y arranques en cada capa y se elimina de manera sencilla la costura visible en algunas piezas de fabricación aditiva (Figura VII.2. (a)). A pesar de sus ventajas esta estrategia cuenta con una dificultad añadida en cuanto a la accesibilidad de la boquilla. Los álabes se generan uno por uno y en su totalidad, por lo tanto,

los ya fabricados dificultan la accesibilidad de los siguientes, según aumenta su número [Calleja et al. 2014 (2)]. Es importante destacar que a pesar de este inconveniente se prosigue con su desarrollo, ya que la estrategia sería válida incluso para la reparación de un álabe individual.

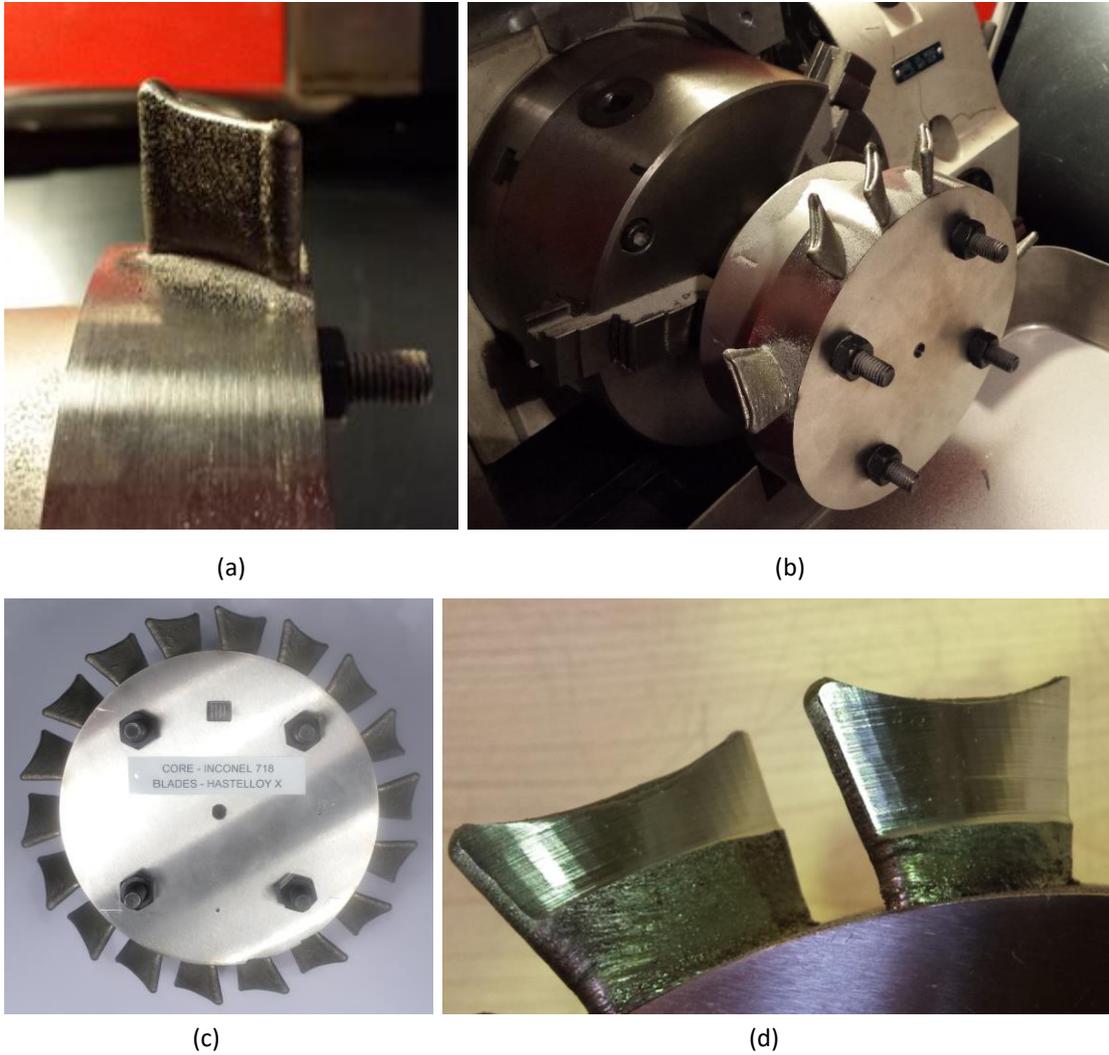


Figura VII.2. (a) Defecto de acumulación de material. (b) Ensayos de estrategias de aporte helicoidales. (c) Aporte de todos los álabes del blisk. (d) Mecanizado de los álabes.

Tras la fabricación de todos los álabes del componente se realiza una digitalización del resultado mediante el uso de un sistema óptico. Su comparación con el diseño original servirá para detectar defectos, y también como punto de partida para la programación de su mecanizado.

La fabricación tarda aproximadamente 22 minutos por álabe, lo que supone un total de 396 minutos para los 18 álabes. O lo que es lo mismo, el blisk tarda en fabricarse en su totalidad, unas 6 y media aproximadamente. Con un flujo de polvo constante de 3 gramos por minuto, el polvo invertido en esta fabricación es de 1,2 kg.

VII.3. Fabricación de un componente tipo *bracket* mediante DED-LB y Ti6Al4V.

El uso de las aleaciones de titanio en el sector aeronáutico es una de las necesidades que impulsa el estudio de esta memoria, y en concreto también el desarrollo de una metodología similar a la anterior para la fabricación y reparación de componentes de este tipo. Dado que el equipamiento a emplear es el mismo se prescinde de su descripción dejando reflejo del mismo en el CAPÍTULO III, del mismo modo que sucede con el material base y el material de aporte. Sin embargo, siendo la aleación de titanio, Ti6Al4V, un material altamente reactivo se empleará el módulo de protección por gas auxiliar para evitar su oxidación. Este módulo ha sido ampliamente descrito también en el CAPÍTULO IV.

En cuanto a la caracterización de los cordones, se emplea, no sólo la información obtenida de la bibliográfica sino, también el conocimiento generado de los ensayos realizados con el módulo de gas auxiliar para aporte de materiales reactivos. Por lo que resulta sencillo llegar al resultado final, sin defectos y, con una caracterización y parámetros de entrada que vienen descritos en la siguiente tabla (Tabla VII.3).

Tabla VII.3. Parámetros de entrada para el aporte de Ti6Al4V.

Potencia láser [W]	Velocidad de avance [mm·min ⁻¹]	Diámetro del haz [mm]	Caudal másico [g·min ⁻¹]	Flujo de gas protector [l·min ⁻¹]	Flujo de gas portador [l·min ⁻¹]	Flujo de gas auxiliar [l·min ⁻¹]
700	800	1,6	3,0	15,0	4,0	10,0

Las características del cordón depositado con estos parámetros son una altura individual de 1,9 mm, con una anchura de 0,41 mm y una penetración en el sustrato del mismo orden. Las capas se crean mediante el solape de hasta un 42,5 % del ancho del cordón. La separación entre cordones de 1,1 mm y da como resultado una altura de capa de 0,6 mm.

La geometría se define a partir de un diseño propio que engloba varios ejercicios diferentes para la generación de trayectorias. Se pretende ensayar, además de la propia fabricación de la pieza, zonas críticas que generalmente dificultan el proceso. Sean dichas características, en este caso en concreto, zonas de paredes delgadas y altas, curvas con puntos de parada, redondeos, agujeros, y crecimiento de geometría en varias direcciones.

Con este perfil, se genera una geometría CAD que será el punto de partida para la fabricación de la pieza, Figura VII.3. En la figura se pueden apreciar las características mencionadas, así como la propuesta de amarre en máquina.

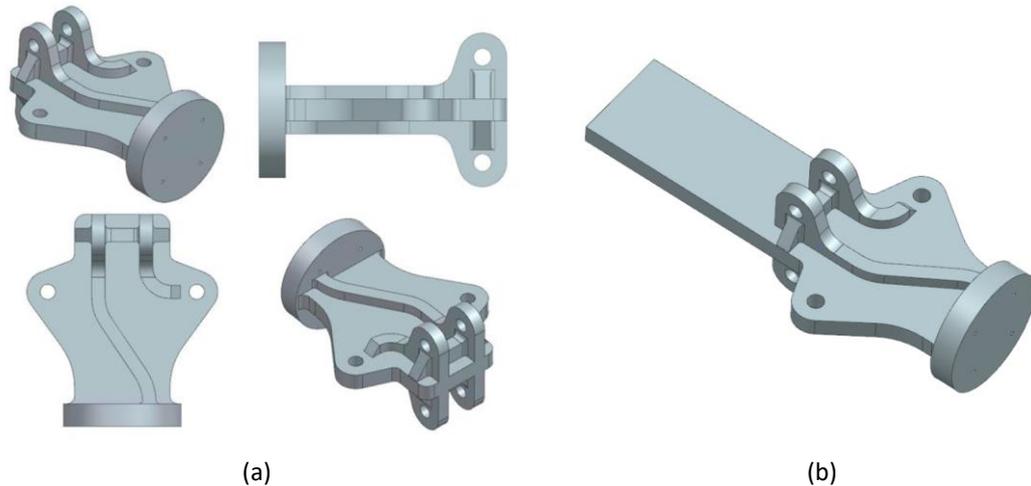


Figura VII.3. CAD de la propuesta de componente tipo bracket. (a) CAD de la pieza final. (b) CAD de la pieza objetivo con material extra para el amarre en máquina.

Se emplean las mismas herramientas de diseño y CAM descritas en el apartado anterior, para generar las trayectorias necesarias para el aporte. Sin embargo, en este caso, y dada las características geométricas de la pieza, no es necesario utilizar más de 4 ejes para su fabricación. El diseño simétrico del componente ofrece la posibilidad de simplificar la programación de las trayectorias y de mitigar algunos posibles efectos de deformación debido a tensiones residuales características de una fabricación de estas dimensiones.

Las pautas de fabricación se representan con diferentes colores en la Figura VII.4, donde se establecen dos posibles estrategias para la fabricación de la pieza. La diferencia entre ambas estrategias reside en la capacidad de sustentación a las etapas siguientes y a la capacidad de evacuación de calor de la geometría que se fabrica durante el proceso.

Las orejetas de color rojo en la Figura VII.4. (a) representan la zona más crítica de aporte. Para conseguir fabricar dicha orejeta, hace falta aportar material sobre el equivalente a una pared delgada, con la problemática que supone por la escasa evacuación de calor que ofrecen los bordes del sustrato. Es por ello, que la secuencia de fabricación será la ilustrada en la Figura VII.4. (b), ya que supone una ventaja estratégica aportando más material que favorezca la evacuación del calor focalizado en las orejetas, cuando se fabriquen posteriormente.

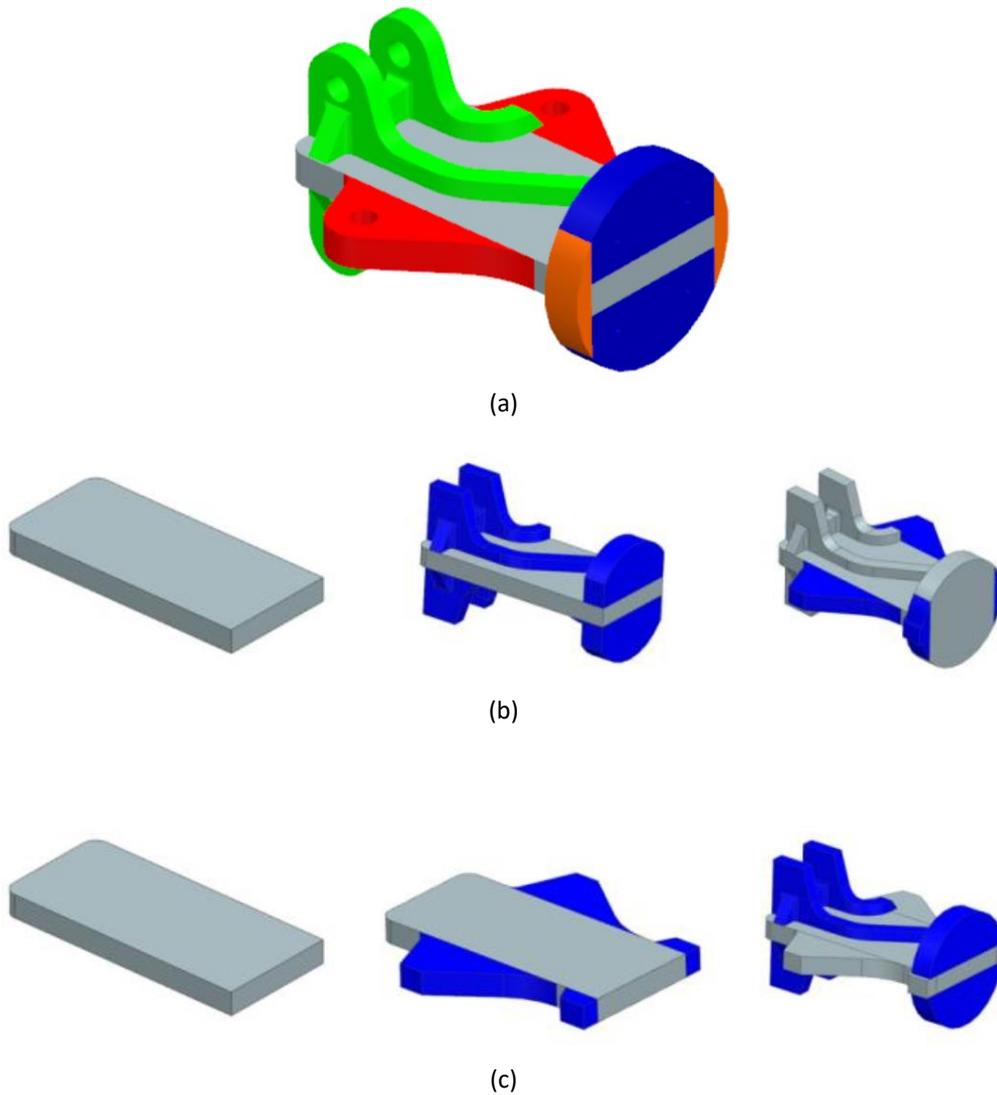


Figura VII.4. Diferentes secuencias de fabricación.

Tras la generación de las trayectorias de aporte, se procede a su fabricación. El proceso de aporte de toda la pieza tiene una duración de aproximadamente 4 horas, lo que supone un consumo de 720 g de polvo de titanio.

VII.4. Conclusiones

De todos los apartados anteriores se puede concluir, que el uso de las diferentes tecnologías expuestas, empleadas de manera conjunta, constituyen una metodología para la fabricación, comprobación y reparación de componentes mediante el proceso de DED-LB.

Este tipo de metodologías tienen como objetivo mejorar el rendimiento de los procesos, reduciendo las redundancias de uso de equipamiento y estableciendo un orden lógico para las

distintas tareas. La obtención de piezas cercanas a la forma final no sólo implica una mejora de la eficiencia de fabricación y ahorro de materiales, sino también

una importante reducción de operaciones de mecanizado y acabado. Disponer de métodos de reparación que permitan recuperar piezas de alto valor añadido, o de gran volumen supone también un importante ahorro económico y de reducción de almacén.

A pesar de todas estas ventajas son muchos los desafíos todavía presentes. Es necesario poder garantizar la repetitividad del proceso, mejorar los acabados, así como profundizar en el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales aportados. Incrementar la productividad de piezas fabricadas mediante procesos aditivos implica continuar con la integración de los procesos de aporte y mecanizado en máquinas híbridas, así como la sensorización y el equipamiento capaz de realizar el seguimiento del proceso y lanzar correcciones durante la producción.

En resumen, se ha conseguido:

- ✓ Caracterizar el material de aporte.
- ✓ Generar la geometría 3D y desarrollar las trayectorias CAM para el aporte de material.
- ✓ Se han desarrollado diferentes estrategias para cada pieza
- ✓ Se ha realizado el proceso de fabricación aditiva mediante DED-LB por inyección de polvo de manera exitosa, tanto para el Hastelloy X como para la aleación de titanio altamente reactiva.
- ✓ Se ha conseguido monitorizar la temperatura y la estabilidad del proceso para asegurar su repetitividad posterior.
- ✓ Se han obtenido unas piezas cercanas a la forma final, que suponen un ahorro en operaciones de mecanizado posterior.
- ✓ La metodologías y operaciones generadas en este capítulo bien pueden ser válidas para tareas de reparación y no sólo de fabricación.

CAPÍTULO VIII. Aportaciones y Líneas Futuras

CAPÍTULO VIII. Aportaciones y Líneas Futuras.

VIII.1. Aportaciones

Las aportaciones descritas en la presente memoria son las siguientes:

- Desarrollo y fabricación de una solución para el aporte de materiales altamente reactivos. Se trata de un módulo accesorio, que se instala en una boquilla de inyección de polvo de DED-LB, y aporta un flujo de gas auxiliar que envuelve la zona de fusión previniendo la oxidación.
- El desarrollo de la solución antes mencionada establece una metodología para el futuro desarrollo de soluciones similares en otras boquillas comerciales o de fabricación propia.
- Se consigue aportar material altamente reactivo (Ti6Al4V) mediante DED-LB por inyección de polvo, con el empleo del módulo de gas auxiliar para la creación de atmósferas inertes locales. El resultado muestra una resistencia a la corrosión similar, sino superior al mismo material base sin ningún tratamiento.
- La solución desarrollada del módulo de gas auxiliar se optimiza para conseguir una reducción del consumo de gas de un 75 %. Se genera conocimiento relativo a los límites cinemáticos que existen para el proceso de DED-LB y en concreto para la solución optimizada del módulo de aporte de materiales altamente reactivos.
- Se estudia la influencia de la presencia de helio en la mezcla de gases del proceso de DED-LB. Los estudios muestran que en situaciones de alta potencia y con determinados materiales puede fomentar la creación de pequeñas cantidades de plasma. Este fenómeno apantalla el proceso de la interacción convencional del haz láser y por lo tanto surgen fenómenos térmicos distintos a los esperados.
- El conocimiento generado se pone a disposición de la creación y fabricación de componentes aeronáuticos cuya finalidad es la de demostradores de la capacidad del proceso de fabricación aditiva.

VIII.2. Líneas Futuras

El conocimiento generado durante los estudios que completan esta memoria abre las puertas a nuevas etapas de investigación relacionadas con fenómenos observados y necesidades técnicas descubiertas.

- La sensorización y monitorización han demostrado ser de gran utilidad durante el desarrollo de los experimentos. La mera recolección de datos ayuda a asegurar la estabilidad del proceso y a la documentación correcta de todos los fenómenos. Es por ello que se entiende que surge una necesidad imperiosa de continuar con la monitorización del proceso y de ser posible permitir el control del mismo llegado el caso. Existen numerosos factores que aún no están siendo registrados y que aportarían información útil, como podría ser el campo térmico de enfriamiento durante el proceso.
- El estudio de las mezclas de gases para el aporte de material mediante DED-LB, no es exhaustivo. Tras ver que incluso con gases nobles surgen fenómenos térmicos que afectan al proceso de aporte, se propone continuar la investigación de estos fenómenos para otros tipos de gases, como por ejemplo el hidrógeno o el dióxido de carbono.
- La optimización de la atmósfera protectora para el aporte de materiales altamente reactivos abre la puerta a la reducción del consumo de gas en el proceso de aporte por DED-LB. Sin embargo, impone un componente de direccionalidad que antes no existía en las boquillas coaxiales continuas. Sería interesante continuar el desarrollo de este tipo de soluciones para conseguir esa reducción del consumo sin el sacrificio de la direccionalidad que supone.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [ACI, 2020] ACI Policy Brief – COVID-19: Relief measures to ensure the survival of the airport industry. Airport Council International. 2020. https://store.aci.aero/wp-content/uploads/2020/05/ACI_PolicyBrief_COVID19_2020_3.pdf (27/02/2024)
- [ADB, 2020] COVID-19 Economic Impact Could Reach \$8.8 Trillion Globally – New ADB Report. Asian Development Bank. 2020. <https://www.adb.org/news/covid-19-economic-impact-could-reach-8-8-trillion-globally-new-adb-report> (27/02/2024)
- [AixPath] <https://aixpath.com/de/>
- [Ålgårdh et al. 2017] Ålgårdh J, Strondl A, Karlsson S, et al. State-of-the-art for Additive Manufacturing of Metals (2016-03898). 2017.
- [Amankwah-Amoah, 2020] Amankwah-Amoah J. Stepping up and stepping out of COVID-19: new challenges for environmental sustainability policies in the global airline industry. J. of Cleaner Production (271:123000). 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123000>.
- [ANSYS] <https://www.ansys.com/>
- [Arrizubieta et al. 2020] Arrizubieta J I, Ukar O, Ostolaza M, Mugica A. Study of the environmental implications of using metal powder in additive manufacturing and its handling. Metals, 10(2), 261. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10020261>
- [Arrizubieta, 2017] Arrizubieta J.I. Laser Metal Deposition enhancement by holistic simulation of powder mass flow and deposition into the melt pool. Doctoral Thesis, University of the Basque Country, Bilbao, 2017.
- [Arrizubieta et al. 2014] Arrizubieta J I, Tabernero I, Ruiz J E, Lamikiz A, Martínez S, Ukar E. Continuous coaxial nozzle design for LMD based on numerical simulation. Physics Procedia, 56, 429–438. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.146>
- [Azarniya et al. 2019] Azarniya A, Colera X G, Mirzaali M J. Additive manufacturing of Tie6Ale4V parts through laser metal deposition (LMD): process, microstructure, and mechanical properties. Journal of Alloys and Compounds, 804, 163-191. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.255>

- [Benn y Salva, 2010] Benn R C y Salva R P. Additively Manufactured Inconel Alloy 718. Proceedings of the 7th Symposium on Superalloy 718 and Derivatives. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118495223.ch35>
- [Bennett et al. 2017] Bennett J, Wolff S, Hyatt G, Ehmann K, Cao J. Thermal effect on clad dimension for laser deposited Inconel 718. J. of Manufacturing Process, 28, 550–557. 2017
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.024>
- [Blakey-Milner et al. 2021] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, Brooks M, Pitot J, Lopez E, Leary M, Berto F, du Plessis A. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. Materials & Design, 209, 110008. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- [Boehm, 2016] Boehm V. Hybrid Manufacturing of Turbine Components. Laser Technik Journal. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/latj.201600013>
- [Boucke, 2011] Boucke, K. Diode Lasers. Tailored Light 2 (Poprawe P), 165–169. Springer. 2011. ISBN: 978-3-642-01236-5.
- [Boyer, 1996] Boyer, R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. Materials Science and Engineering: A, 213(1-2), 103-114. 1996.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10233-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1)
- [Calleja et al. 2014] Calleja A, Tabernero I, Fernández A, Celaya A, Lamikiz A, y López de Lacalle L N. Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations. Optics and Lasers in Engineering, 56, 113–120. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.12.017>
- [Calleja et al. 2014 (2)] Calleja A, Tabernero I, Ealo J A, Campa F J, Lamikiz A, López de Lacalle L N. Feed rate calculation algorithm for the homogeneous material deposition of blisk blades by 5-axis laser cladding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 74, 1219-1228. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6057-3>
- [Carlota, 2019] Carlota, V., 2019. The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing, 3D Natives, available online: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/#>
- [Caujolle, 2017] Caujolle M. First titanium 3D-printed part installed into serial production aircraft. 2017. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2017-09-first-titanium-3d-printed-part-installed-into-serial-production>

- [Chryssolouris, 1991] Chryssolouris G. Basics of Laser Machining. Laser Machining. Laser Machining (Mechanical Engineering Series). Springer. 1991.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4084-4_3
- [Cortina et al. 2018] Cortina M, Arrizubieta J I, Ruiz J E, Lamikiz A, Ukar E. Design and manufacturing of a protective nozzle for highly reactive materials processing via Laser Material Deposition. Procedia CIRP, 68, 387–392. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.100>
- [Cui et al. 2011] Cui C, Hu B, Zhao L, Liu S. Titanium alloy production technology, market prospects, and industry development. Materials & Design, 32(3), 1684-1691. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.011>
- [Das et al. 2012] Das M, Balla V K, Basu D, Manna I, Kumar T S, Bandyopadhyay A. Laser processing of in situ synthesized TiB–TiN-reinforced Ti6Al4V alloy coatings. Scripta Materialia, 66(8), 578-581. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.010>
- [Das et al. 2014] Das M, Bhattacharya K, Dittrick S A, Mandal C, Balla V K, Kumar T S, Manna I. In situ synthesized TiB–TiN reinforced Ti6Al4V alloy composite coatings: microstructure, tribological and in-vitro biocompatibility. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 29, 259-271. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.09.006>
- [Dahotre et al. 2008] Dahotre N B, Harimkar S P. Laser Fabrication and Machining of Materials. Springer. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-72344-0>
- [Dausinger, 2004] Dausinger F, Lubatschowski H, Lichtner F. Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications. Springer. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/b96440>
- [Donachie, 2000] Donachie M J. Titanium: a technical guide. ASM international. 2000.
ISBN: 978-0-87170-686-7
- [Duley, 1983] Duley W W. Laser Processing and Analysis of Materials. Springer. 1983.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0193-7>
- [Einstein, 1917] Einstein A. On the quantum theory of radiation. Physika Zeitschrift 18, 121-128. 1917. https://resolver.sub.uni-hamburg.de/kitodo/PPN891110208_0018 (27/02/2024)
- [Elmer et al. 2015] Elmer J W, Vaja J, Carlton H D, Pong R. The Effect of Ar and N2 Shielding Gas on Laser Weld Porosity in Steel, Stainless Steels, and Nickel. Welding Journal, 94, 313s–

325s. American Welding Society. 2015.

https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2015_10_s313.pdf

[Frazier, 2014] Frazier W E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Material Engineering and Performance*, 23 (6) 1917–1928. 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

[Gasser, 2011] Gasser A. *Laser Metal Deposition. Tailored Light 2* (Poprawe, P), 15-40. Springer. 2011. ISBN 978-3-642-01236-5.

[Gasser, 2011 (2)] Gasser A. *Laser Metal Deposition. Tailored Light 2* (Poprawe, P), 216-224. Springer. 2011. ISBN 978-3-642-01236-5.

[Giannatsis y Dedoussis, 2009] Giannatsis J, Dedoussis V. Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1-2), 116-127. 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1308-1>

[González et al. 2017] González H, Arrizubieta I, Calleja A, Ruiz J E, Lamikiz A. CAM development for Additive Manufacturing in turbo-machinery components. *Procedia Manufacturing*, 13, 802-809. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.187>

[Gorynin, 1999] Gorynin I V. Titanium alloys for marine application. *Materials Science and Engineering: A*, 263(2), 112-116. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01180-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01180-0)

[Gurrappa, 2003] Gurrappa I. Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications. *Materials Characterization*, 51(2-3), 131-139.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2003.10.006>

[Haken, 1983] Haken H. *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*. Springer Series in Synergetics. 1983

[Hauser, 2014] Hauser C. Case study: laser powder metal deposition manufacturing of complex real parts, *Materials Joining and Engineering Technologies*. 2014.

<https://docplayer.net/48458850-Case-study-laser-powder-metaldeposition-manufacturing-of-complex-real-parts.html>

[Hedrick et al. 2015] Hedrick R W, Urbanic R J, y Burford C G. Development considerations for an additive manufacturing CAM system. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2327–2332. 2015.

DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.435>

- [Hofmann et al. 2014] Hofmann D C, Roberts S, Otis R, Kolodziejka J, Dillon R P, Suh J O, Borgonia J P. Developing gradient metal alloys through radial deposition additive manufacturing. Scientific reports, 4(1), 1-8. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep05357>
- [Hua et al. 2009] Hua T, Jing C, Fengying Z, Xin L, Weidong H. Microstructure and mechanical properties of laser solid formed Ti-6Al-4V from blended elemental powders. Rare Metal Materials and Engineering, 38(4), 574-578. 2009.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(10\)60028-8](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(10)60028-8)
- [IATA. 2020] Air transport & COVID-19 coronavirus. International Air Transport Association 2020.
www.airlines.iata.org.
- [ICAO. 2020] Air Transport Bureau Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis. International Civil Aviation Organization (ICAO). 2020.
<https://www.icao.int/Pages/default.aspx>
- [Jyothish y Prof. Krishnadas, 2017] Jyothish K y Prof. Krishnadas N. Laser metal deposition repair applications for Inconel 718 alloy. Materials Today: Proceedings, 4, 11068–11077. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.068>
- [Kaser] David Kaser. Laser Powder Fusion Welding. Huffman Corporation.
- [Kerstens et al. 2021] Kerstens F, Cervone A, Gradl P. End to end process evaluation for additively manufactured liquid rocket engine thrust chambers. Acta Astronautica, 182, 454–465. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.02.034>
- [Kledwig et al. 2019] Kledwig C, Perfahl H, Reisacher M, Brückner F, Bliedtner J, Leyens C. Analysis of Melt Pool Characteristics and Process Parameters Using a Coaxial Monitoring System during Directed Energy Deposition in Additive Manufacturing. Materials, 12 308. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12020308>
- [Jyothish Kumar y Krishnadas Nair, 2017] Jyothish Kumar L y Krishnadas Nair C G. Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry. Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies, 39-54. Springer. 2017.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2_4
- [Li et al. 2015] Li P, Yang T, Li S, Liu D, Hu Q, Xiong W, Zeng X. Direct laser fabrication of nickel alloy samples. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 1288–1294. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.01.014>

- [Lindwall et al. 2018] Lindwall G, Wang P, Kattner U R, Campbell C E. The effect of oxygen on phase equilibria in the Ti-V system: impacts on the AM processing of Ti alloys. JOM, 70(9), 1692-1705. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3008-8>
- [Liu et al. 2015] Liu S, Zhang Y, Kovacevic R. Numerical Simulation and Experimental Study of Powder Flow Distribution in High Power Direct Diode Laser Cladding Process. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2, 199-218. Springer. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40516-015-0015-2>
- [Liu et al. 2017] Liu R, Wang Z, Sparks T, Liou F, Newkirk J. Aerospace applications of laser additive manufacturing. In: Laser Additive Manufacturing. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier, 351–71. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.
- [Liu y Shin, 2019] Liu S y Shin Y C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. Materials & Design, 164. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
- [Maiman, 1960] Maiman T.H. Stimulated optical radiation in ruby. Nature 187:493-494. 1960.
DOI: <https://doi.org/10.1038/187493a0>
- [Mans, 2011] Mans T. Laser Beam Sources. Tailored Light 2 (Poprawe, R). Springer. 2011.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-01237-2_10
- [Market Research Future, 2021] Market Research Future, Aerospace Additive Manufacturing Market, 1551. 2019. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/aerospace-additive-manufacturing-market> (27/02/2024).
- [Martin et al. 2020] Martin A, Markhvida M, Hallegatte S, Walsh B. Socio-economic impacts of COVID-19 on household consumption and poverty. Economic Disaster and Climate Change, 4:453–79. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41885-020-00070-3>
- [Muhammad et al. 2020] Muhammad S, Long X, Salman M. COVID-19 pandemic and environmental pollution: a blessing in disguise? Science of The Total Environment, 728:138820. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820>.
- [Najmon et al. 2019] Najmon J C, Raeisi S, Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, 7–31. Elsevier. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>

- [Ni et al. 2020] Ni M, Qin X, Liu H, Hu Z. Analysis and design of coaxial nozzle with rectangular outlet for high power diode laser in laser metal deposition. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106, 4789-4803. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04874-w>
- [Norsk Titanium, 2017] Norsk Titanium to Deliver the World's First FAA-Approved, 3DPrinted, Structural Titanium Components to Boeing. Norsk Titanium.
<https://www.norsktitanium.com/media/press/norsk-titanium-to-deliver-the-worlds-first-faa-approved-3d-printed-structural-titanium-components-to-boeing> (27/02/2024)
- [NX, Siemens] <https://www.plm.automation.siemens.com>
<https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/nx/formanufacturing/cam/hybrid-additive-manufacturing.shtml> (27/02/2024)
- [Optomec, 2016] LENS Component Repair Solution. Optomec. 2016. https://optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/Optomec_LENS_Blisk_Repair_Datasheet.pdf (27/02/2024)
- [Patschgera et al. 2011] Patschgera A, Sahibb C, Bergmann J P, Basticka A. Process Optimization through Adaptation of Shielding Gas Selection and Feeding during Laser Beam Welding. Physics Procedia, 12, 46–55. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.007>
- [Petrat et al. 2016] Petrat T, Graf B, Gumenyuk A, Rethmeier M. Laser Metal Deposition as repair technology for a gas turbine burner made of Inconel 718. Physics Procedia, 83, 761–768. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.078>
- [Puertas et al. 2013] Puertas I, Luis Pérez C J, Salcedo D, León J, Luri R, Fuertes J P. Precision Study of a Coordinate Measuring Machine Using Several Contact Probes. Procedia Engineering, 63, 547-555. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.260>
- [Ready, 1997] Ready J F. Industrial Applications of Lasers. Elsevier. 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-583961-7.X5000-5>
- [Ruiz et al. 2018] Ruiz J E, Cortina M, Arrizubieta J I, Lamikiz A. Study of the Influence of Shielding Gases on Laser Metal Deposition of Inconel 718 Superalloy. Materials, 11(8), 1388. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11081388>
- [Saboori et al. 2017] Saboori A, Gallo D, Biamino S, Fino P, Lombardi M. An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: microstructure

and mechanical properties. Applied Sciences, 7(9), 883. 2017.

DOI: <https://doi.org/10.3390/app7090883>

[Sahasrabudhe y Bandyopadhyay, 2016] Sahasrabudhe H, Bandyopadhyay A. Additive manufacturing of reactive in situ Zr-based ultra-high temperature ceramic composites.

JOM, 68(3), 822-830. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-015-1777-x>

[Singh et al. 2017] Singh P, Pungotra H, y Kalsi N S. On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications. Materials today: proceedings, 4(8), 8971-8982. 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.249>

[Snyder y Thole, 2019] Snyder J C, Thole C A. Effect of additive manufacturing process parameters on turbine cooling. Journal of Turbomachinery, 142(5): 051007. 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4046459>

[Sobieralski, 2020] Sobieralski J B. COVID-19 and airline employment: insights from historical uncertainty shocks to the industry. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 5, 100123. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100123>

[Steen, 1991] Steen W M. Laser Material Processing. Springer. 1991.

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3820-4>

[Svelto, 1989] Orazio Svelto. Principles of Lasers. Springer. 1989.

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7670-9>

[Svelto, 1998] Orazio Svelto. Principles of Lasers. Springer. 1998.

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6266-2>

[Tapoglou et al. 2020] Tapoglou N, Clulow J, Curtis D. Increased shielding of a Direct Energy Deposition process to enable Deposition of reactive materials; an investigation into Deposition of 15-5 PH Stainless Steel, Inconel 718 and Ti-6Al-4V. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 36, 227-235. 2022.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.11.013>

[TBRC, 2021] Aerospace Global Market Report 2021: COVID 19 Impact and Recovery to 2030. The Business Research Company. 2021.

https://www.reportlinker.com/p06018925/Aerospace-Global-Market-ReportCOVID-19-Impact-and-Recovery-to.html?utm_source=GNW (27/02/2024)

- [Thompson et al. 2016] Thompson M K, Moroni G, Vaneker T, Fadel G, Campbell R I, Gibson I, Bernard A, Schulz J, Graf P, Ahuja B, Martina F. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737-760. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- [Toyserkani et al. 2004] Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S. *Laser Cladding*, 11–50. Taylor & Francis Group. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420039177>
- [Traxel y Bandyopadhyay, 2018] Traxel K D y Bandyopadhyay A. Reactive-deposition-based additive manufacturing of Ti-Zr-BN composites. *Additive Manufacturing*, 24, 353-363. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.005>
- [Wolbarsht, 1991] Wolbarsht M L. *Laser Applications in Medicine and Biology*. Volume 5. Springer. 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1704-1>
- [Walachowicz et al. 2017] Walachowicz F, Bernsdorf I, Papenfuss U, Zeller C, Graichen A, Navrotsky V, Rajvanshi N, Kiener C. Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing. *Journal of Industrial Ecology*, 21 (S1) S203–S215. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12637>
- [Wester, 2011] Wester R. Absorption of Laser Radiation. *Tailored Light 2 (Poprawe R)*, 15-41. Springer. 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-01237-2_3
- [Wohlers T, 2013] Wohlers T, Caffrey T. Wohlers report 2013: additive manufacturing and 3D printing state of the industry—annual worldwide progress report. Fort Collins, CO: Wohlers Associates; 2013.
- [Wohlers, 2016] Wohlers Report 2016
- [Wohlers Associates, 2017] Wohlers Associates. Wohlers report: 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Fort Collins, CO: Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates; 2017.
- [Wohlers, 2023] Wohlers Report 2023
- [Xue et al. 2015] Xue L, Li Y, Chen J, Wang S. Laser consolidation: a novel additive manufacturing process for making net-shape functional metallic components for gas turbine applications. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, vol. 6. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2015-43971>

- [Yan et al. 2014] Yan M, Dargusch M S, Ebel T, Qian M. A transmission electron microscopy and three-dimensional atom probe study of the oxygen-induced fine microstructural features in as-sintered Ti-6Al-4V and their impacts on ductility. *Acta Materialia*, 68, 196-206. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.015>
- [Yu et al. 2012] Yu J, Rombouts M, Maes G, Motmans F. Material properties of Ti6Al4 v parts produced by laser metal deposition. *Physics Procedia*, 39, 416-424. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.056>
- [Zhang et al. 2018] Zhang Y, Wu L, Guo X, Kane S, Deng Y, Jung Y G, Zhang J. Additive manufacturing of metallic materials: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>