

Tesis Doctoral

**Fabricación de Componentes Metálicos
Mediante Fabricación Aditiva Láser DED en
Máquinas Híbridas**

Presentada por:

D. Pedro Ramiro Castro

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

Dirigida por

Prof. D. Aitzol Lamikiz Mentxaka

Dra. Dña. Amaia Alberdi Gurrutxaga

Bilbao, enero de 2021

Tesis Doctoral

**Fabricación de Componentes Metálicos
Mediante Fabricación Aditiva Láser DED en
Máquinas Híbridas**

Presentada por:

D. Pedro Ramiro Castro

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

Dirigida por

Prof. D. Aitzol Lamikiz Mentxaka

Dr. Dña. Amaia Alberdi Gurrutxaga

Bilbao, enero de 2021

A Arantxa, sin tu apoyo no habría sido posible llegar hasta aquí

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer el apoyo recibido por parte de todas las personas que me han ayudado a realizar esta tesis.

En primer lugar, quiero mencionar a mis directores de tesis Aitzol Lamikiz Mentxaka y Amaia Alberdi Gurrutxaga por toda la ayuda, orientación, colaboración y motivación sin la cual no habría podido llegar a culminar esta tesis. Agradezco el apoyo de todos mis compañeros de Tecnalía con los que he tenido la suerte de trabajar, en especial a Mikel Ortiz Edesa, con el que he trabajado durante todo este tiempo y del que tanto he aprendido sobre fabricación aditiva. También quería mostrar mi agradecimiento a los miembros del proyecto europeo "PARADDISE", dentro del cual se ha desarrollado esta tesis, por todo lo que he aprendido con ellos.

En segundo lugar, quiero mencionar a la gente que de alguna manera ha influido en el largo recorrido que me ha llevado hasta el doctorado. Por supuesto el apoyo de mi familia, dentro de la cual he aprendido todas las aptitudes que me han hecho llegar hasta aquí, y también a mi familia política por su apoyo incondicional. A mis amigos, tanto a los de la infancia como a mis antiguos compañeros de la panadería Galparsoro S.A (todos tenemos un pasado) que tanto me apoyaron durante mis estudios.

También quiero hacer una especial mención a Joaquín Albisua Garmendia, de quien fui alumno mientras cursaba mi grado en ingeniería mecánica, y sin cuya orientación y consejo no podría haber tomado el camino que me ha llevado a realizar esta tesis.

A todos ellos, muchas gracias.

Por último, el mayor de mis agradecimientos para la persona que más me ha apoyado a pesar del tiempo que esta tesis me ha robado. Arantxa, gracias por la comprensión, paciencia y ánimo que me has brindado.

Resumen

La fabricación aditiva es una de las tecnologías clave dentro del desarrollo industrial debido al alto potencial que conlleva. Sin embargo, el potencial que tiene de forma global proviene de las familias tecnológicas que la componen, las cuales a nivel individual difieren tanto en la tecnología utilizada, el proceso de aporte y los materiales utilizados como en la calidad, productividad y eficiencia del componente fabricado.

Es en una de estas tecnologías en la que se centra la presente tesis. En concreto en la fabricación aditiva por láser mediante aporte de polvo metálico. Aunque esta tecnología es todavía conocida por el término “Laser Metal Deposition” (LMD), tanto este como otros términos utilizados son marcas registradas por lo que la normativa actual se refiere a él como “powder-fed Directed Energy Deposition” (powder-fed DED) pudiendo usarse también el término “Laser Cladding” si se utiliza para la aplicación de recubrimientos. Esta tecnología ha mostrado una gran facilidad de hibridación con el mecanizado convencional en máquinas herramientas multiprocesos, siendo actualmente varios los modelos ofertados por fabricantes a nivel mundial. Sin embargo, la hibridación requiere de un alto conocimiento del proceso de aporte y de las diferencias que se deben tener en cuenta durante el mecanizado del material aportado por fabricación aditiva.

El presente trabajo de tesis doctoral se ha desarrollado dentro del proyecto europeo “PARADDISE: A Productive, Affordable and Reliable solution for large scale manufacturing of metallic components by combining laser-based Additive and Subtractive processes with high Efficiency” [PARADDISE, 2016], financiado por el programa “Photonics and Factories of the Future”, para fortalecer la competitividad y sostenibilidad de la industria europea dentro del marco de investigación y desarrollo “Horizon 2020”. El objetivo de este proyecto es estudiar y optimizar el proceso para la fabricación de componentes de grandes dimensiones mediante la combinación de la fabricación aditiva por aporte láser de polvo metálico y el mecanizado convencional.

El material central de esta tesis es una aleación base níquel químicamente equivalente al Inconel®718. Esta superaleación es ampliamente utilizada en industrias como la aeronáutica y la petroquímica debido a su combinación única de propiedades como una alta resistencia en aplicaciones a temperaturas elevadas, resistencia a la degradación química y resistencia al desgaste. Sin embargo, los resultados obtenidos no son solo aplicables a este material.

La optimización del proceso, que ha sido realizada en la máquina híbrida multiprocesos IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process, se ha basado inicialmente

en una sucesión de estudios experimentales con el fin de conocer mejor el proceso y caracterizarlo, obteniendo una ventana de parámetros en función de la estructura y características geométricas del material aportado. Además de las ecuaciones que relacionan los parámetros principales del proceso con las características geométricas del cordón simple, también se han establecido los límites geométricos de los componentes obtenidos mediante el proceso en distintas disposiciones de trabajo, estrategias de aporte y boquillas.

Los resultados obtenidos en el estudio experimental han servido para desarrollar un modelo geométrico que permite predecir las características geométricas de los recubrimientos y de estructuras multicapa a través de las características del cordón simple y que es aplicable con las boquillas utilizadas durante este trabajo. Este modelo también ha demostrado buenos resultados con otros materiales y equipos pudiendo predecir la geometría de la dilución, alturas de capa o espesores del recubrimiento además del solapamiento límite en el que se inicia la falta de fusión con el sustrato.

Por último, se ha desarrollado la estrategia de aporte multicapa basándose en la información aportada por el modelo geométrico. Para validarla, se ha utilizado un algoritmo desarrollado mediante el lenguaje de programación Python y se han fabricado varios componentes multicapa de geometría compleja. Los desarrollos realizados a lo largo de esta tesis se han validado a través de la fabricación de una sección basada en la carcasa de una turbina de baja presión.

Índice de contenidos

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	i-1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	i-5
ÍNDICE DE TABLAS.....	i-17
NOMENCLATURA.....	i-20
CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN	I-1
1 Contexto tecnológico e industrial	I-1
2 Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos	I-5
3 Organización del Trabajo de Tesis Doctoral	I-6
CAPÍTULO II : ESTADO DEL ARTE	II-1
1 Proceso DED basado en láser y polvo metálico	II-1
1.1 Parámetros del proceso de aporte	II-2
1.2 Estrategia de aporte	II-4
1.3 Materiales.....	II-4
1.3.1 Características del polvo metálico	II-5
1.3.2 Aspectos relacionados con la Seguridad y Riesgos para la Salud.....	II-6
1.4 Aplicaciones industriales	II-7
1.4.1 Fabricación 3D de componentes y/o detalles	II-7
1.4.2 Recubrimientos.....	II-8
1.4.3 Reparación de componentes	II-9
1.5 Sectores industriales	II-9
1.6 Estructura y características mecánicas	II-11
1.7 Post-procesado del material aportado por DED	II-14
2 Equipo del proceso de aporte láser de polvo metálico.....	II-15
2.1 Generador Láser	II-15
2.2 Cabezal láser	II-17

2.2.1	Densidad de energía del haz láser	II-17
2.2.2	Distribución de energía	II-17
2.2.3	Beam Parameter Product (BPP)	II-18
2.2.4	Tipo de cabezal láser	II-19
2.3	Alimentador de Polvo	II-20
2.4	Configuración cinemática de los ejes de la máquina.....	II-22
3	Modelización y simulación del proceso	II-23
4	Monitorización y control	II-26
4.1	Monitorización del baño fundido.....	II-27
4.2	Altura de capa	II-29
4.3	Flujo de polvo.....	II-30
4.4	Verificación de la geometría obtenida	II-30
5	Hibridación: Fabricación aditiva + Sustractivo.....	II-31
5.1	Residuos.....	II-35
5.2	Seguridad.....	II-36
6	Fabricación de componentes de Inconel 718 mediante aporte láser DED en máquinas híbridas (DED + mecanizado).....	II-37
6.1	Inconel®718.....	II-37
6.2	Estructura y tratamientos térmicos del Inconel 718.....	II-40
6.3	Propiedades del Inconel 718 aportado por láser	II-43
6.4	Mecanizado del Inconel 718.....	II-45
CAPÍTULO III : ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE APORTE POR LÁSER.....		III-1
1	Introducción.....	III-1
2	Equipamiento experimental.....	III-2
2.1	Máquina híbrida: IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process	III-2
2.1.1	Cabezal láser	III-3
2.1.2	Alimentador de polvo	III-5
2.1.3	Generador láser.....	III-5
2.1.4	Gas de arrastre y protección.....	III-5

2.2	Materiales.....	III-5
2.3	Equipamiento de medición y caracterización	III-6
3	Optimización del proceso de aporte	III-7
3.1	Análisis del flujo de polvo	III-7
3.1.1	Calibración del flujo de polvo	III-9
3.1.2	Análisis del flujo de polvo a la entrada del cabezal.....	III-13
3.1.3	Evaluación de la variación del flujo de polvo en un aporte de larga duración.....	III-16
3.2	Estudio experimental del punto de convergencia y máxima concentración (distancia focal) del flujo de polvo para distintos cabezales.....	III-18
3.2.1	Comprobación del punto de máxima eficiencia de aporte.	III-22
3.2.2	Estudio de la distribución del flujo de polvo en el punto de máxima concentración.	III-27
3.3	Evaluación de las condiciones de aporte al inicio y al final del proceso de aporte.....	III-28
4	Estudio experimental del proceso de aporte	III-30
4.1	Caracterización del proceso de aporte.....	III-31
4.2	Estudio del efecto de la inclinación del sustrato y del cabezal en el proceso de aporte.	III-47
4.3	Estudio del proceso de aporte en la fabricación de una pared inclinada.....	III-54
4.4	Estructura y propiedades mecánicas del Inconel 718 aportado por láser.....	III-63
4.4.1	Propiedades mecánicas.....	III-63
4.4.2	Estructura y dureza.....	III-64
5	Conclusiones	III-67
CAPÍTULO IV : DESARROLLO DE UN MODELO GEOMÉTRICO Y ESTRATEGIAS PARA EL APORTE DE GEOMETRÍAS DE SECCIÓN VARIABLE.....		
IV-1		
1	Introducción.....	IV-1
2	Desarrollo del modelo para recubrimientos de una capa	IV-2

2.1	Validación en Inconel 718	IV-7
2.2	Validación en otros materiales	IV-9
2.2.1	Materiales	IV-9
2.2.2	Validación de los recubrimientos	IV-10
3	Aporte en estructura multicapa.....	IV-12
4	Adaptación del modelo para estructuras de sección variable	IV-15
4.1	Cálculo de las trayectorias de aporte	IV-16
4.2	Algoritmo de la trayectoria.....	IV-19
4.3	Validación.....	IV-23
4.3.1	Crecimiento de la sección variable en un lado (Caso 1 y 3) ...	IV-23
4.3.2	Sección variable en ambos lados (Caso 4).....	IV-28
5	Conclusiones del modelo geométrico desarrollado.....	IV-30
CAPÍTULO V : VALIDACIÓN		V-1
1	Introducción.....	V-1
2	Definición del caso de uso	V-3
3	Fabricación de la preforma y resultados.....	V-6
4	Conclusiones	V-14
CAPÍTULO VI : APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO		VI-1
1	Aportaciones.....	VI-1
2	Líneas futuras	VI-4
REFERENCIAS.....		1

Índice de figuras

Figura I-1. Previsión de la demanda de aviones en el periodo 2019-2038 según Boeing [Boeing, 2019]. Previsiones previas al Covid-19.	I-1
Figura I-2. Pronóstico del mercado de la fabricación aditiva metálica a corto plazo [AMPOWER, 2020].	I-2
Figura I-3: Fases del ciclo de sobreexpectación.	I-4
Figura I-4. Niveles TRL de madurez tecnológica y valle de la muerte.	I-4
Figura II-1: Esquema del proceso DED, utilizando como fuente de energía un láser e inyectando polvo metálico.	II-2
Figura II-2. Parámetros que afectan al proceso de aporte [Toyserkani, 2004].	II-3
Figura II-3: Imágenes obtenidas por MEB. a) Distribución de partículas esféricas; b) Distribución de partículas irregulares y satélites.	II-5
Figura II-4: Símbolos de sustancias peligrosas, a) Sustancia tóxica, irritante, narcótica, peligrosa; b) Sustancia inflamable; c) Sustancia peligrosa para el cuerpo, mutágeno, carcinógeno, reprotóxico; d) Sustancia dañina para el medio ambiente.	II-7
Figura II-5. Ejemplos de aplicaciones. a) Fabricación aditiva de los filetes de un eje extrusor; b) Recubrimiento y reparación de un taco de estampación.	II-8
Figura II-6. Estructuras de la sección transversal de cordones de Inconel 718 aportado por láser con diferentes parámetros. a) Columnares dendríticos con presencia de granos equiaxiales; b) Granos columnares dendríticos orientados en la dirección del gradiente térmico.	II-11
Figura II-7. Marcas de enfriamiento siguiendo el gradiente de temperatura en AISI 316L.	II-12
Figura II-8. Grieta en recubrimiento de base níquel Colmonoy 56P2 sobre acero 42CrMoS4 sin precalentar.	II-12
Figura II-9. Perfiles de durezas Rockwell de diferentes materiales aportados sobre sustrato de acero 42CrMoS4 sin templar. a) Eutroloy 16006N; b) Eutroloy 16606A.	II-13
Figura II-10: Factores de absorción para diferentes materiales dependiendo de la longitud de onda [Kaminski, 2011].	II-16

Figura II-11: a) Representación del punto focal del haz láser (zona de máxima convergencia); b) Rango de trabajo de distintos procesos láser [Majumdar & Manna, 2011].	II-17
Figura II-12: Representación de la planta y alzado de las distintas distribuciones de energía del haz láser.	II-18
Figura II-13. Esquema del Beam Parameter Product (BPP).	II-18
Figura II-14: Comparación de distintos sistemas láser [Rodrigues, 2014].	II-19
Figura II-15: a) Cabezal lateral; b) Cabezal coaxial discreto; c) Cabezal coaxial continuo; d) Cabezal axial.	II-20
Figura II-16: Tipos de alimentadores de polvo. a) Alimentador de disco; b) Alimentador de husillo; c) Alimentador de lecho fluido; d) Alimentador vibratorio.	II-22
Figura II-17: Configuraciones cinemáticas típicas en máquinas híbridas de proceso aditivo + sustractivo [Cortina, 2018-a].	II-22
Figura II-18: Cabezal láser MWO-I Powder diseñado para robot serial. Fuente: [KUKA, 2020].	II-23
Figura II-19. Esquema del proceso de aporte según el modelo numérico [Arrizubieta, 2018].	II-24
Figura II-20. a) Sección transversal del cordón simple como parte de una circunferencia perfecta [El Cheikh, 2012-b]; b) Sección transversal del cordón solapado suponiendo una geometría circular [Zhang, 2014].	II-25
Figura II-21. Esquema del cálculo del perfil del recubrimiento según Ocelik et al. [Ocelík, 2014].	II-26
Figura II-22. Imagen y medición de temperatura con una cámara térmica.	II-28
Figura II-23. Sistema AM Assistant de DMG Mori para sus máquinas híbridas y de láser DED.	II-29
Figura II-24. Medición de un recubrimiento aportado por láser mediante luz estructurada.	II-31
Figura II-25. Cabezal láser intercambiable AMBIT™. Fuente: Hybrid Manufacturing Technologies [H.M.T.-b, 2020].	II-32
Figura II-26. Máquina híbrida ZVH Add+Process de la empresa Ibarria: Aporte láser DED y mecanizado multiproceso en 5 ejes.	II-33
Figura II-27. Máquina híbrida LASERTEC 65 3D de la empresa DMG Mori: Aporte láser DED y fresado en 5 ejes.	II-34

Figura II-28. Máquina híbrida INTEGREX i-400AM de la empresa Mazak: Aporte láser DED y mecanizado multiproceso en 5 ejes.	II-34
Figura II-29. Requisitos mínimos de seguridad de los equipos láser según la norma UNE EN 60825-1 /A2: 2002.	II-37
Figura II-30. Esfuerzo de ruptura a altas temperaturas de las superaleaciones [Donachie, 2002].	II-38
Figura II-31. Diagrama TTT del Inconel 718 [Donachie, 2002].	II-42
Figura II-32. Absorción del níquel a diferentes longitudes de onda del haz láser [KEYENCE, 2019].	II-43
Figura II-33. Zona de transición columnar a equiaxial [Rottwinkel, 2014].	II-44
Figura II-34. Tipo de estructura del Inconel 718 dependiendo de la velocidad de enfriamiento y el gradiente térmico [Sui, 2019].	II-45
Figura II-35. Paredes fabricadas: a) Aporte por láser; b) Mecanizando material forjado [Ostra, 2019].	II-47
Figura II-36. Evolución del momento flector con el tiempo a profundidad de corte constante en todo el contorno de la pared [Ostra, 2019].	II-47
Figura II-37. Virutas obtenidas durante el mecanizado de las paredes: a) Pared por aporte láser; b) Pared forjada [Ostra, 2019].	II-48
Figura III-1. IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process	III-2
Figura III-2. Esquema de la configuración del equipo.	III-3
Figura III-3. a) Esquema de las lentes colimadora y focal; b) Ruleta focal del cabezal láser.	III-4
Figura III-4. Dimensiones de las boquillas utilizadas: a) Módulo de la boquilla discreta de 4 vías; b) Módulo de la boquilla coaxial continua de 151.9 mm de longitud.	III-4
Figura III-5. Morfología de la partícula de la aleación 718.	III-6
Figura III-6. Estructura de la placa forjada ATI 718.	III-6
Figura III-7. Sensor de flujo FlowWatch de Medicoat.	III-7
Figura III-8. Relación lineal típica en la calibración del flujo suministrado en función de la rotación del disco del alimentador volumétrico.	III-8
Figura III-9. Colocación del sensor al lado del alimentador de polvo.	III-9

- Figura III-10. Valores de tensión obtenidos a distintas velocidades de rotación del disco del alimentador de polvo durante 195 segundos..... III-9
- Figura III-11. Representación de las distintas zonas de estudio de la señal de la tensión en cada prueba..... III-10
- Figura III-12. Ecuación inicial (en negro) y ecuación final (en rojo) tras 5 iteraciones..... III-11
- Figura III-13. Datos obtenidos en cada prueba en función del flujo de polvo.III-12
- Figura III-14. Relación lineal entre el flujo promedio y la rotación del alimentador de polvo. En negro la relación inicial, en rojo la relación final tras la quinta iteración..... III-13
- Figura III-15. Colocación del FlowWatch tras conectarlo al conducto de entrada del polvo del cabezal..... III-13
- Figura III-16. Datos obtenidos en cada prueba en función del flujo de polvo.III-14
- Figura III-17. Representación de las distintas zonas de estudio de la señal de la tensión en cada prueba..... III-14
- Figura III-18. Señal adquirida durante el aporte de polvo. En negro la señal adquirida y en rojo la señal tras aplicar un filtro de media móvil. Línea discontinua roja: Límite máximo y mínimo de la señal filtrada. Línea discontinua verde: Valor estimado según la relación lineal rotación-flujo : a) Rotación del alimentador al 40%; b) Rotación del alimentador al 50%. III-17
- Figura III-19. Utillaje diseñado para el estudio del flujo de polvo. a) Esquema; b) Punto de convergencia del flujo en el cabezal discreto de 4 vías; c) Punto de convergencia en el cabezal coaxial continuo. III-18
- Figura III-20. Boquillas de corte láser con distinto diámetro: a) Imagen de las boquillas y el utillaje; b) Dimensiones de las boquillas. III-19
- Figura III-21. Efectos del caudal del gas de arrastre en la concentración del flujo de polvo empleando una boquilla discreta de 4 vías. Datos obtenidos empleando una boquilla de 4 mm de diámetro de entrada en el contenedor del utillaje. III-19
- Figura III-22. Resultados de la distribución del polvo de la Inconel 718 a distintas distancias de la boquilla coaxial discreta de 4 vías y distintos flujos de polvo (círculo $11,3 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$; triángulo $18,4 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$)..... III-20
- Figura III-23. Resultados de la distribución del polvo de la Inconel 718 a distintas distancias de la boquilla: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua con ranura de 0,5 mm..... III-21

- Figura III-24. Resultados de la distribución del polvo de la Inconel 718 a distintas distancias de la boquilla: a) Boquilla coaxial continua con ranura de 0,75 mm; b) Boquilla coaxial continua con ranura de 1 mm. III-22
- Figura III-25. Cristal de protección dañado por proyecciones generadas durante el proceso de aporte. III-23
- Figura III-26. Resultados de la penetración y anchura del baño fundido sobre sustrato AISI 316L. a) Ruleta focal al 4; b) Ruleta focal al 10. III-24
- Figura III-27. Valores de la penetración y la anchura obtenida con la ruleta focal al 4 y al 10. III-24
- Figura III-28. Resultados a 700 W de potencia y distintos valores de la ruleta focal sobre sustrato AISI 316L. Comparación de las geometrías del baño fundido. III-25
- Figura III-29. Valores de la penetración y la anchura obtenida con distintos valores de la ruleta focal. III-25
- Figura III-30. Eficiencia del proceso según el tipo de boquilla a distintas distancias de trabajo. III-26
- Figura III-31. Secciones transversales de los cordones aportados a distintas distancias con la boquilla discreta de 4 vías: a) 12,5 mm; b) 13,5 mm; c) 14,5 mm, d) 15,5 mm. III-26
- Figura III-32. Puntos sobre el plano XY a la distancia de aporte en los cuales se hicieron las mediciones para obtener la gráfica de la distribución del polvo. III-27
- Figura III-33. Gráficas obtenidas de la distribución del polvo a la distancia de aporte: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías a 14.5 mm de distancia; b) Boquilla coaxial continua de 0.5 mm a 11.5 mm de distancia; c) Proyección en el eje X de la distribución en ambas boquillas; d) Proyección en el eje Y de la distribución en ambas boquillas. III-28
- Figura III-34. Datos adquiridos a una potencia nominal de 2500 W. III-29
- Figura III-35. Relación lineal de la distancia inicial recorrida hasta obtener la potencial y velocidades nominales. III-30
- Figura III-36. Cordones aportados con la boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-31
- Figura III-37. Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. Relación de la altura con la inversa del avance para $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ y potencias de 2500, 2200 y 1900 W. .. III-32
- Figura III-38. Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. Ecuación de la altura en función del flujo de polvo. III-32

- Figura III-39. Coeficiente del flujo de polvo para la ecuación de altura con la boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-33
- Figura III-40. Altura del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-34
- Figura III-41. Altura del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-34
- Figura III-42. Anchura del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-35
- Figura III-43. Anchura del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-35
- Figura III-44. Área del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-36
- Figura III-45. Gráfica del área del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-36
- Figura III-46. Penetración del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-37
- Figura III-47. Penetración del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-38
- Figura III-48. Dilución del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-39
- Figura III-49. Dilución del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-39
- Figura III-50. Eficiencia del polvo según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-40

- Figura III-51. Eficiencia del polvo según la ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-40
- Figura III-52. MDR según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-41
- Figura III-53. MDR según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-42
- Figura III-54. Productividad del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-42
- Figura III-55. Productividad del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. III-43
- Figura III-56. Gráficas de la forma del área de la sección transversal del material depositado: a) Boquilla discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0.5 mm. III-45
- Figura III-57. Gráficas de la forma del área de la dilución de la sección transversal del material depositado: a) Boquilla discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0.5 mm. III-46
- Figura III-58. Comparación del modelo de la sección transversal con las macrográficas de la sección real obtenida con la boquilla discreta de 4 vías (línea amarilla correspondiente al área y la roja a la zona de la dilución): a) 2500 W, $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $18 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$; b) 1900 W, $1100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $18 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$; c) 2500 W, $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $11 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ III-47
- Figura III-59. Comparación del modelo de la sección transversal con las macrográficas de la sección real obtenida con la boquilla coaxial continua de 0.5 mm (línea amarilla correspondiente al área y la roja a la zona de la dilución): a) 2500 W, $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $18 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$; b) 2500 W, $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $18 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$; c) 1900 W, $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ III-47
- Figura III-60. Estrategias del estudio del efecto de la inclinación y la gravedad en el proceso de aporte: (a) Estrategia 1 ($\alpha=\beta$); (b) Estrategia 2 ($\alpha=0$); (c) Estrategia 3 ($\beta=0$). III-49
- Figura III-61. Evolución de las características dimensionales del cordón con un avance de $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ respecto del control: a), c) y e) boquilla discreta de 4 vías; b), d) y f) boquilla continua. III-50
- Figura III-62. Evolución del área respecto a α y β , y avances de 500 y 900 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ III-51

- Figura III-63. Efecto de la gravedad en la boquilla continua: a) real; b) esquema.
..... III-52
- Figura III-64. Comparación de la sección transversal de los cordones obtenidos con la boquilla discreta (en azul) con el modelo empírico (línea roja) a diferentes ángulos y estrategias, y un avance de $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. La relación de aspecto aumenta y el ángulo de mojado disminuye en las estrategias 2 y 3..... III-54
- Figura III-65. Estrategias para la fabricación de paredes inclinadas: a) Estrategia A (4-ejes); b) Estrategia B (3 ejes). III-55
- Figura III-66. a) Esquema para el cálculo de la anchura total de la pared; b) Incremento de la anchura de la pared hasta alcanzar un valor constante. .. III-56
- Figura III-67. Dimensiones geométricas de la pared. III-58
- Figura III-68. Paredes inclinadas fabricadas con la boquilla discreta y la Estrategia A: a) Ángulos de 60° , 70° , 80° y 90° ; b) Sección transversal de una pared con ángulo de 60° III-58
- Figura III-69. Paredes a 60° : a) Comparación de paredes fabricadas con las Estrategias A y B y la boquilla discreta; b) Comparación de distorsiones en los bordes de la pared; c) Secciones transversales..... III-61
- Figura III-70. Paredes a 60° con 20 mm de longitud fabricadas con la boquilla continua y la Estrategia B..... III-61
- Figura III-71. Comparación de las dimensiones de la anchura inicial (W_i) y la anchura de la pared (W_w) a $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ III-62
- Figura III-72. Comparación de las dimensiones de la altura (H_w) y longitud de la pared (L_w) a $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ III-62
- Figura III-73. Comparación de las dimensiones de la anchura inicial (W_i) y la anchura de la pared (W_w) a $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ III-62
- Figura III-74. Comparación de las dimensiones de la altura (H_w) y longitud de la pared (L_w) a $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ III-62
- Figura III-75. Probetas de tracción extraídas de las paredes: a) Probetas fabricadas en dirección horizontal y vertical dentro de la pared; b) Probetas para evaluar la zona de unión entre sustrato y pared..... III-63
- Figura III-76. Propiedades mecánicas de la pared aportada por láser. En azul las propiedades en la dirección vertical; En rojo las propiedades en dirección horizontal; En verde las propiedades de la zona de unión entre sustrato y pared.
..... III-64
- Figura III-77. Paredes fabricadas: a) Aporte por láser; b) Mecanizando material forjado. III-65

- Figura III-78. Perfil de durezas de las paredes..... III-65
- Figura III-79. Macrografía y microestructura de la pared fabricada por aporte láser. III-66
- Figura III-80. Macrografía y microestructura de la pared forjada..... III-66
-
- Figura IV-1. Cordón individual: a) Macrofotografía de la sección transversal de un cordón individual; b) Esquema de las características del cordón individual.IV-3
- Figura IV-2. Recubrimiento depositado con la estrategia en zig-zag: a) Esquema de la sección transversal resultante; b) Esquema de la estrategia en Zig-zag.IV-3
- Figura IV-3. Modelo geométrico: a) cordón inicial i ; b) nuevo cordón $i+1$ aportado solapando el anterior cordón i ; c) geometría de parábola de segundo grado del cordón $i+1$ al sumar el área solapada y la aportada; d) características finales del cordón $i+1$IV-4
- Figura IV-4. Esquema de la dilución en el nuevo cordón $i+1$: a) Real; b) Modelo.IV-6
- Figura IV-5. Sección transversal comparada con la obtenida por el modelo. El material aportado y la dilución calculada por el modelo se muestran con las líneas blanca y roja discontinua respectivamente: a) Recubrimiento 1; b) Recubrimiento 2; c) Recubrimiento 3.IV-8
- Figura IV-6. Comparación del modelo con las secciones transversales de recubrimientos de Eutroloy 16606A.04. El material aportado y la dilución calculada por el modelo se muestran con las líneas blanca y roja discontinua respectivamente: a) Recubrimiento 1; b) Recubrimiento 2; c) Recubrimiento 3.IV-11
- Figura IV-7. Falta de material calculada por el modelo en los bordes del recubrimiento: a) Modelo con forma de parábola de segundo grado; b) Aproximación suponiendo bloques rectangulares.....IV-12
- Figura IV-8. Representación del área extra necesaria para compensar la falta de material en los bordes del recubrimiento dependiendo del porcentaje de solapamiento. Área representada en el porcentaje correspondiente del área del cordón simple. En azul: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la primera parte del recubrimiento; Naranja: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la parte final del recubrimiento. Datos obtenidos del modelo para

Alloy 718 depositado con el cabezal verticalmente a 2500 W, 18 g·min ⁻¹ and 500 mm·min ⁻¹	IV-13
Figura IV-9. Esquema de la estrategia de fabricación con el cordón extra cada dos capas.....	IV-14
Figura IV-10. Resultados de la pared recta: a) Sección transversal de la pared sin cordones extra; b) Sección transversal de la pared fabricada con cordones extra.	IV-15
Figura IV-11. Longitud del recubrimiento o sección (L _c).....	IV-17
Figura IV-12. Porcentaje de solapamiento de N _c + 1 cordones con relación a una capa con la misma sección con N _c cordones al 40 %.	IV-18
Figura IV-13. Área extra necesaria para compensar la falta de material en los bordes en función del porcentaje de solapamiento. Área representada en el porcentaje correspondiente del área del cordón simple. En azul: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la primera parte del recubrimiento; Naranja: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la parte final del recubrimiento. Datos obtenidos del modelo para Alloy 718 depositado con el cabezal verticalmente a 2500 W, 18 g·min ⁻¹ and 500 mm·min ⁻¹	IV-19
Figura IV-14. Lógica de cálculo del algoritmo.....	IV-20
Figura IV-15. Geometrías posibles en función de la geometría: a) Geometrías dentro del caso 1; b) Geometrías dentro del caso 2; c) Geometrías dentro del caso 3; d) Geometría dentro del caso 4.	IV-21
Figura IV-16. a) Sección transversal del CAD de la geometría en mm; b) Esquema de la estrategia de aporte.....	IV-23
Figura IV-17. Efecto de la inclinación de la boquilla en las características del cordón simple.....	IV-24
Figura IV-18. Esquema de la estrategia empleada en los Casos 1 y 3. Zona de inicio con aporte de material con el cabezal recto. Resto de cordones aportados en la dirección del extremo final de la geometría con el cabezal inclinado. .	IV-24
Figura IV-19. Sección transversal: a) Dimensiones; b) Comparación con el CAD.	IV-25
Figura IV-20. Resultados: a) Corte de la geometría de sección variable para analizar la estructura y las dimensiones geométricas; b) Poro de menos de 25 μm.	IV-27
Figura IV-21. Estrategia de aporte del caso 4.	IV-28
Figura IV-22. Cola de Milano: a) Corte de la sección transversal; b) Comparación de la sección real con la geometría objetivo.....	IV-29

Figura IV-23. Sección tras ataque químico y microestructura.	IV-30
Figura V-1. Imagen de una turbina de avión. Marcado en rojo la carcasa de la turbina de baja presión y su disposición en el conjunto total de la turbina. Imagen obtenida del catálogo de productos de la empresa [GKN aerospace, 2020]...V-3	
Figura V-2. Diseño de la pieza test emulando una carcasa de una turbina de baja presión.	V-4
Figura V-3. Preforma para obtener la geometría tras mecanizar: a) Geometría objetivo; b) Preforma para la obtención de la geometría tras el mecanizado. .V-5	
Figura V-4. Imagen de la preforma que contiene la geometría total de la pieza test.	V-5
Figura V-5. Detalle del CAD de la preforma para la validación de la estrategia y los parámetros: a) Perfil y dimensiones; b) Frontal y dimensiones; c) Vista de la pared.	V-6
Figura V-6. Trayectorias en que se divide la preforma según las ecuaciones del perfil.	V-7
Figura V-7. Trayectorias en que se divide la preforma según las ecuaciones del perfil y las condiciones de aporte.	V-9
Figura V-8. Geometría en función de los parámetros del proceso y del tipo de caso según la estrategia de aporte.	V-9
Figura V-9. Esquema de las trayectorias de los distintos casos que componen la pared: a) Caso 1; b) Caso 3; c) Caso 2. En el caso 2 hay dos posibilidades ya que no importa el extremo de inicio de la trayectoria.	V-10
Figura V-10. Fabricación del perfil mediante aporte láser.	V-11
Figura V-11. Geometría final: a) Geometría final; b) Perfil final.....	V-11
Figura V-12. CAD de la geometría escaneada.....	V-12
Figura V-13. Comparación de la geometría escaneada con el CAD teórico y detalle del borde de la pared. En el detalle del borde el rango de valores negativos representa falta de material. El rango de valores positivos señala áreas con demasía con respecto al CAD teórico.	V-12
Figura V-14. Eje vertical y horizontal con unidades en mm. Comparación de la sección transversal de la preforma fabricada (Línea negra) con el del CAD teórico (en verde).....	V-13

Figura V-15. Histograma de desviaciones. Los valores positivos representan demasía de material. Los valores negativos representan falta de material...V-13

Figura V-16. Imagen de la geometría tras el proceso de corte por agua y mecanizado. No se perciben defectos.V-14

Figura VI-1. Geometría aportada en plano inclinado a 51° respecto de la horizontal.....VI-5

Figura VI-2. Geometría de revolución y detalle aportado a 60° respecto de la horizontal.....VI-5

Figura VI-3. Proceso de aporte en condiciones de baja potencia para reparación y fabricación de detalles por aditivo en carcasas de turbinas de baja presión.VI-6

Índice de tablas

Tabla II-1. Resumen de exponentes resultantes en diversos trabajos encontrados por Bax et al. [Bax, 2018].	II-4
Tabla II-2. Ejemplos de aplicaciones por sectores industriales	II-10
Tabla II-3. Composición química Inconel 718 (wt.%),	II-39
Tabla III-1. Composición química del polvo y el sustrato (wt. %).	III-5
Tabla III-2. Tiempos en cada zona para cada rotación del alimentador de polvo.	III-10
Tabla III-3. Error relativo inicial y tras 5 iteraciones.	III-12
Tabla III-4. Tiempos en cada zona para cada rotación del alimentador de polvo.	III-15
Tabla III-5. Polvo calculado en gramos por zonas y tiempo equivalente con el promedio del flujo de polvo inyectado.	III-16
Tabla III-6. Valores de los parámetros utilizados.	III-20
Tabla III-7. Potencias máximas recomendadas para cada valor de la ruleta focal.	III-23
Tabla III-8. Rango de tiempo en segundos en cada parte.	III-29
Tabla III-9. Parámetros de la caracterización.	III-31
Tabla III-10. Desviaciones de las ecuaciones y del proceso para las dos boquillas caracterizadas.	III-33
Tabla III-11. Ecuaciones de la altura del cordón individual: A_h , B_h , C_h son ecuaciones lineales de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico de polvo. A_h' es una ecuación de segundo grado de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm que dependen del flujo másico de polvo. Unidades: W, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$.	III-33
Tabla III-12. Ecuaciones de la anchura del cordón individual: A_w es una ecuación de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico de polvo. A_w' , B_w' son ecuaciones de segundo grado de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm que dependen del flujo másico de polvo. Unidades: W (KW con la coaxial continua), $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$.	III-35
Tabla III-13. Ecuaciones del área del cordón individual: A_A y B_A son ecuaciones de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico	

de polvo. A_A' , B_A' son ecuaciones de lineales de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm que dependen del flujo másico de polvo. Unidades: W, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	III-36
Tabla III-14. Ecuaciones de la penetración del cordón individual: A_p y B_p son ecuaciones de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico de polvo. C_p y D_p son ecuaciones de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen de la potencia. A_p' , B_p' son ecuaciones de segundo grado de la boquilla coaxial continua de 0.5 mm que dependen del flujo másico de polvo. C_p' , D_p' son ecuaciones de lineales de la boquilla coaxial continua de 0.5 mm que dependen de la potencia. Unidades: W, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ and $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ (Boquilla coaxial continua); KW, $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ y $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ (Boquilla discreta de 4 vías).	III-37
Tabla III-15. Valoración de la influencia de cada parámetro principal en las características geométricas del cordón individual aportado.	III-38
Tabla III-16. Valoración de la influencia de cada parámetro principal en diferentes características del cordón individual aportado.....	III-43
Tabla III-17. Parámetros y características de los cordones seleccionados ..	III-49
Tabla III-18. Parámetros del proceso para el estudio del efecto de la inclinación y la gravedad.....	III-50
Tabla III-19. Parámetros del proceso para el aporte de paredes inclinadas.	III-57
Tabla III-20. Eficiencia y MDR con diferentes boquillas, estrategias y ángulos de inclinación (las paredes fabricadas con defectos están marcadas con "X", las paredes obtenidas a $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ están marcadas con *)	III-59
Tabla III-21. Parámetros de fabricación de la pared por aditivo.	III-63
Tabla IV-1. Parámetros principales del proceso de fabricación de los recubrimientos.....	IV-7
Tabla IV-2. Características del cordón individual que forma cada recubrimiento calculadas mediante el modelo para la boquilla discreta de 4 vías.	IV-7
Tabla IV-3. Desviación máxima del espesor y dilución del modelo respecto a la sección real.	IV-8
Tabla IV-4. Composición química del polvo y el sustrato (wt. %).	IV-10
Tabla IV-5. Parámetros principales del proceso de fabricación de los recubrimientos.....	IV-10

Tabla IV-6. Características del cordón individual que forma cada recubrimiento.	IV-10
Tabla IV-7. Parámetros principales de la pared recta.	IV-13
Tabla IV-8. Validación del Caso 1 y 3. Parámetros del proceso.....	IV-24
Tabla IV-9. Parámetros de cada capa y valor medio total. Porcentaje de solapamiento (d_o), número de cordones por capa (N_c) y altura de capa calculada por el modelo (H_L).	IV-25
Tabla IV-10. Parámetros del proceso.....	IV-28
Tabla V-1. Altura de capa máxima (H_L) en función del ángulo (θ) para el desplazamiento horizontal máximo (ΔX) seleccionado	V-8
Tabla V-2. Parámetros del proceso para cada condición de la geometría de la pared. H_L es la altura de capa estimada por el modelo en esas condiciones de aporte y con un d_o del 50 %.	V-8

Nomenclatura

Acrónimos

BPP	Beam Parameter Product
CAD	Computer Aided-Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided-Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
DED	Directed Energy Deposition
ECHA	European Chemicals Agency
HAZ	Heat Affected Zone (Zona Afectada Térmicamente)
HIP	Hot Isostatic Pressure
IPCS	International Programme on Chemical Safety
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LMD	Laser Metal Deposition
MAG	Metal Active Gas
MEB	Microscopio Electrónico de Barrido
MIG	Metal Inert Gas
MQL	Minimum Quantity Lubrication
PBF	Powder Bed Fusion
TCP	Tool Center Point
TIG	Tungsten Inert Gas
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

Variables

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>
A	Área del cordón individual	mm ²
a _e	Profundidad de corte radial	mm
A _E	Área de la esfera	mm ²
A ₀	Área del control	mm ²
a _p	Profundidad de corte axial	mm
A _T	Área en cada capa	mm ²
d _o	Porcentaje de solapamiento	%
D _o	Distancia de solapamiento	mm
D _w	Tiempo de espera entre pasadas	s
h	Altura del cordón individual	mm
h ₀	Altura del control	mm
H _L	Altura de capa	mm
H _w	Altura de la pared	mm
K	Factor de corrección de la anchura de la pared	mm
L _w	Longitud de la pared	mm
MDR	Material Deposition Rate	Kg· h ⁻¹
m _r	Peso tras el aporte	g
m _i	Peso antes del aporte	g
ṁ _p	Flujo másico de polvo	g·min ⁻¹
N	Velocidad del husillo	rpm
N _c	Número de cordones por capa	-
N _L	Número de capas de la pared	-
p	Penetración del cordón individual	mm
P	Potencia del láser	W
t _{DED}	Tiempo del proceso de aporte	s

v	Avance del proceso DED	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$
V_E	Volumen de la esfera	mm^3
w	Anchura del cordón individual	mm
w_0	Anchura del control	mm
W_i	Anchura inicial de la pared	mm
W_T	Anchura total por capa	mm
W_w	Anchura de la pared	mm
α	Ángulo de inclinación de la boquilla respecto al eje vertical	°
β	Ángulo de inclinación del sustrato respecto al eje horizontal	°
ΔX	Desplazamiento horizontal	mm
ΔZ	Desplazamiento vertical	mm
η	Eficiencia	%
θ	Ángulo de inclinación de la pared	°
ρ_p	Densidad del polvo de aporte	$\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$
σ	Desviación típica	-

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1 Contexto tecnológico e industrial

Aunque tradicionalmente ha sido el sector aeronáutico el que más interés ha mostrado en adoptar la fabricación aditiva [ADDISPACE, 2016], actualmente el sector petroquímico se ha sumado a esta posibilidad. En este sector las superaleaciones base níquel y cobalto son comúnmente utilizadas, al igual que en el sector aeronáutico, aunque debido principalmente a su excelente resistencia a la corrosión. La previsión de ingresos asociados solo al mercado de la industria del petróleo y del gas dentro de la fabricación aditiva es de 2 billones de dólares en ventas anuales para 2027 [GlobeNewswire, 2017].

Por otro lado, el número de aviones debería aumentar considerablemente en los próximos 20 años, según el pronóstico de mercado global de Airbus para 2017-2036 [Airbus, 2018]. En este periodo de tiempo se anticipa que el tráfico aéreo crecerá un 4,4% anualmente lo que se traducirá en la necesidad de un aumento de la flota de aviones en 35.000 unidades por un valor de 5,3 billones de dólares en los próximos 20 años. Además, se prevé que el volumen de negocio asociado a la reparación y revisión de mantenimiento sea de un total de 1,8 billones de dólares en el mismo periodo. Boeing por su parte pronostica un escenario parecido en el periodo 2019-2038 (Figura I-1) donde se debería duplicar el número de aviones comerciales y reemplazar más del 75% de la flota actual (19.000 aviones).

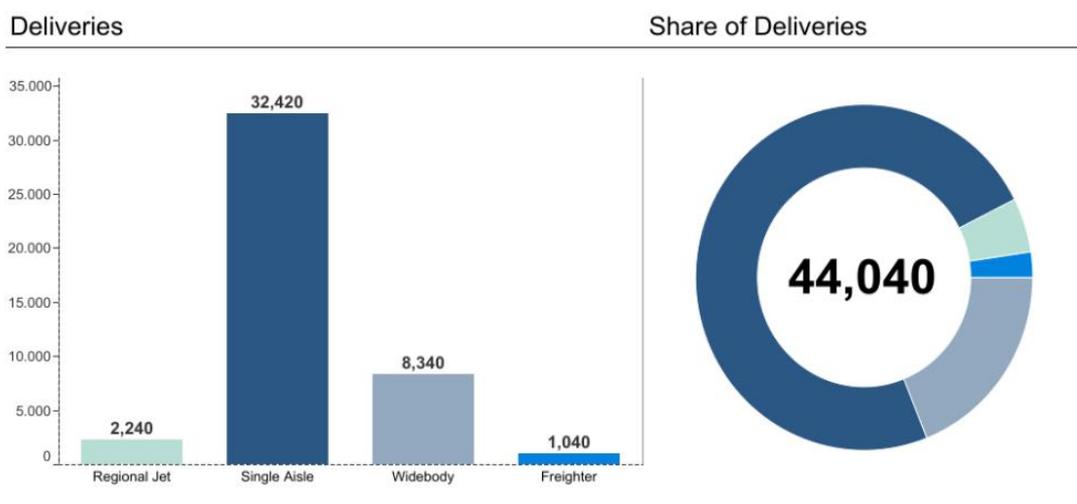


Figura I-1. Previsión de la demanda de aviones en el periodo 2019-2038 según Boeing [Boeing, 2019]. Previsiones previas al Covid-19.

La aparición de las primeras piezas fabricadas por tecnología aditiva DED que han sido certificadas para su uso en el sector aeronáutico [Jackson, 2018] abren este sector como un prometedor nicho de mercado.

Sin embargo, todas estas previsiones de crecimiento han quedado truncadas debido a la pandemia global por Covid-19. Como ejemplo de los efectos en el sector aeronáutico, actualmente el número de desplazamientos se ha reducido drásticamente, pasando de un valor medio en torno a los 27.000 vuelos diarios a menos de 2000 en un mes [ICAO, 2020]. Las previsiones de recuperación en la cifra de desplazamientos y de crecimiento actual del sector son de un plazo de entre tres y cinco años [Faury, 2020], siendo todavía un escenario muy incierto, lo cual deja al sector aeronáutico dentro de la mayor crisis que ha tenido en su historia. Las previsiones del sector petroquímico no son mejores. A las consecuencias económicas de la crisis del coronavirus se ha de sumar las consecuencias de la guerra de precios entre dos pesos pesados de la producción internacional como son Arabia Saudita y Rusia, que han puesto en caída el valor del petróleo [Lima, 2020]. La caída en la demanda y la necesidad de vender de los países productores han reducido los precios a los de hace veinte años [Rogers, 2020]. El daño que puede provocar en el sector esta situación dependerá del tiempo que dure [Rubeis, 2020]. Según los pronósticos más desfavorables, no se prevé una recuperación del consumo a niveles del 2019 hasta el año 2023 aunque el excedente de productos petroquímicos puede durar hasta el año 2025 generando una caída de precios prolongada y, por tanto, una pérdida de beneficios del sector [Malik, 2020].

Sin embargo, aunque hay previsiones optimistas de recuperación en el año 2021 en el mercado de la fabricación aditiva metálica (Figura I-2), la mayoría prevén varios años para una recuperación total. A largo plazo se prevé un aumento del mercado a partir del 2025 y un incremento notable para el 2030 según el informe de IDTechEx [Spiegel, 2020].

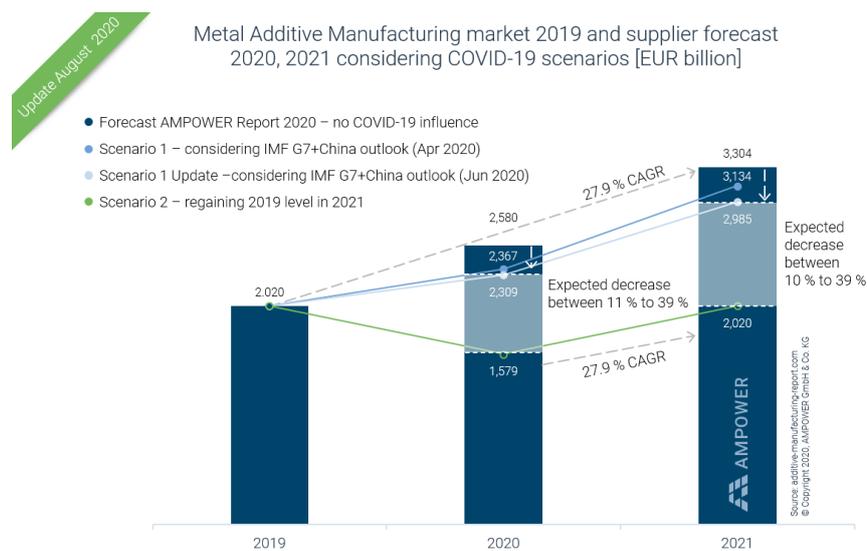


Figura I-2. Pronóstico del mercado de la fabricación aditiva metálica a corto plazo [AMPOWER, 2020].

Por tanto, es de esperar un periodo de varios años de contracción del mercado hasta volver a cifras Previas al Covid-19 tras lo cual se mantienen las previsiones de crecimiento con el retraso lógico de los años de pandemia.

Independientemente de la situación actual del Covid-19 o de si se cumplen los pronósticos que auguran un mercado de la fabricación aditiva de más de 350 billones de dólares para 2035 [BCG, 2017], hay que tener en cuenta que la fabricación aditiva se encuentra en la rampa de consolidación del ciclo de sobreexpectación, avanzando paso a paso con cada aplicación realizada con éxito. Este ciclo es una representación gráfica de la madurez, adopción y aplicación comercial de una tecnología específica y está dividida en cinco fases (Figura I-3):

- Lanzamiento: La primera fase de un ciclo es el "lanzamiento", una presentación del producto o cualquier otro evento genera interés y presencia en los medios.
- Pico de expectativas sobredimensionadas: En la siguiente fase, el impacto en los medios genera normalmente un entusiasmo y expectativas poco realistas. Es posible que algunas experiencias pioneras se lleven a cabo con éxito, pero habitualmente hay más fracasos.
- Abismo de desilusión: Las tecnologías entran en el abismo de desilusión porque no se cumplen las expectativas. Estas tecnologías dejan de estar de moda y, en consecuencia, por lo general la prensa abandona el tema.
- Rampa de consolidación: Aunque la prensa haya dejado de cubrir la tecnología, algunas empresas siguen, a través de la "pendiente de la iluminación", experimentando para entender los beneficios que puede proporcionar la aplicación práctica de la tecnología.
- Meseta de productividad: Una tecnología llega a la "meseta de productividad", cuando sus beneficios están ampliamente demostrados y aceptados. La tecnología se vuelve cada vez más estable y evoluciona en segunda y tercera generación. La altura final de la meseta varía en función de si la tecnología es ampliamente aplicable o sólo beneficia a un nicho de mercado.

Por tanto, independientemente de las consecuencias de la pandemia, el mercado real que la fabricación aditiva puede abordar dependerá de lo rápido que llegue a la meseta de productividad del ciclo de sobreexpectación. Es en esta dirección donde aparecen las máquinas híbridas (fabricación aditiva + mecanizado), buscando una máquina multiprocesos robusta y flexible para propiciar un proceso más estable y rápido donde realizar todos los pasos

necesarios para obtener la pieza final. Dentro de la fabricación aditiva, se preveía que solo el mercado de las máquinas híbridas alcanzase los 6.757 millones de dólares para 2026 [TMR, 2018]. Vista la situación actual, es de prever un plazo mayor de tiempo para alcanzar esas cifras.

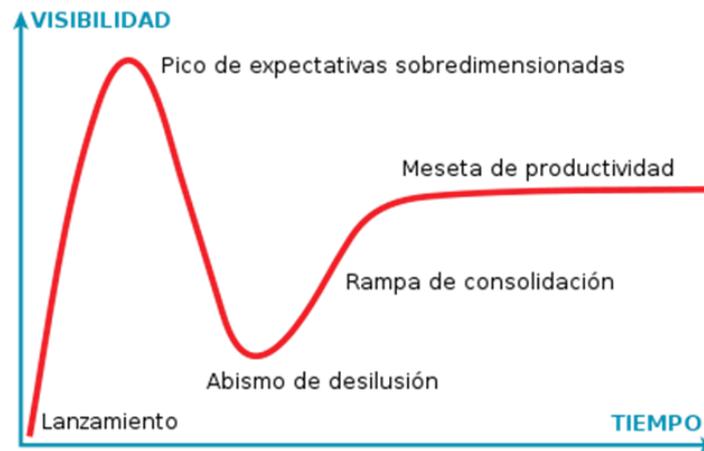


Figura I-3: Fases del ciclo de sobreexpectación.

Es en este contexto donde se realiza el proyecto europeo “A Productive, Affordable and Reliable solution for large scale manufacturing of metallic components by combining laser-based ADDitive and Subtractive processes with high Efficiency” [PARADDISE, 2016], dentro del cual se realiza la presente tesis doctoral utilizando la máquina híbrida IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process y trabajando con diferentes superaleaciones. Los objetivos de este proyecto europeo es obtener una solución híbrida total robusta dentro de esta máquina pasando de TRL3 a TRL5 durante el proyecto y esperando pasar de TRL6 a TRL9 en 2-3 años tras terminar el proyecto.

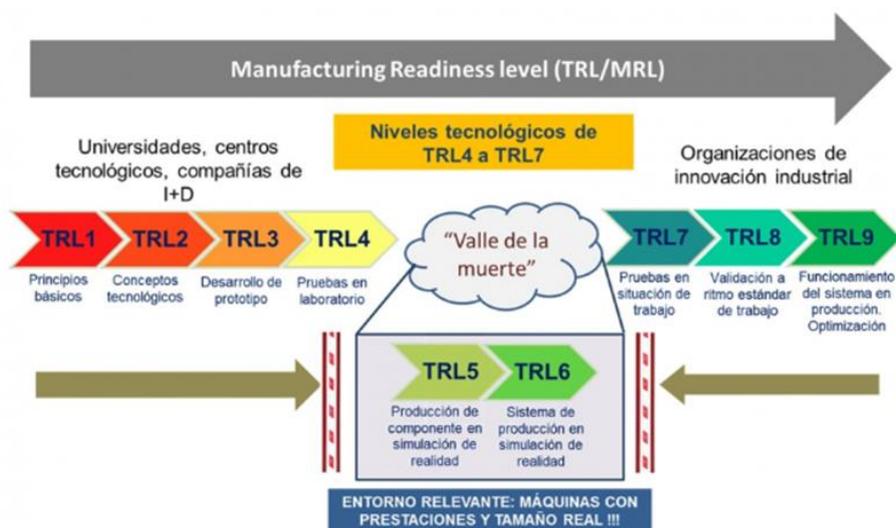


Figura I-4. Niveles TRL de madurez tecnológica y valle de la muerte.

La adopción de la fabricación híbrida “aporte por láser de polvo metálico + mecanizado” presenta las siguientes ventajas:

- Trabajar con multitud de materiales incluyendo superaleaciones.
- Poder realizar el proceso completo de fabricación en la misma máquina.
- Poder aplicarse para reparación, recuperación y recubrimientos con mejora de propiedades a desgaste y corrosión.
- Contar con la precisión y robustez de la máquina herramienta convencional.
- Aplicaciones interesantes para sectores estratégicos como son los sectores aeronáutico y petroquímico.

Sin embargo, estas ventajas no son aplicables sin un mayor conocimiento del proceso y la madurez tecnológica necesaria que deben ser alcanzados en los próximos años.

En este contexto industrial, solo las máquinas híbridas que integren un proceso aditivo de calidad y que garanticen su ejecución de forma robusta serán las máquinas que finalmente se incorporen al mercado.

2 Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos

A pesar de que el proceso de aporte por láser es bien conocido, todavía no hay una homogeneidad de criterios en el estado del arte debido principalmente a que los resultados están muy influenciados por el equipo utilizado. Así pues, la mayoría de las ventanas de parámetros y modelizaciones matemáticas son exclusivas para un equipo, boquilla, láser o material concreto. A esta situación se suma que en el estado del arte apenas hay estudios sobre estrategias de aporte y límites geométricos. Esto hace necesario desarrollar experimentos para entender y optimizar el proceso y poder diferenciar parámetros inherentes al equipamiento, establecer la influencia de los parámetros principales, definir los límites geométricos que pueden ser obtenidos, desarrollar las estrategias de aporte y los modelos geométricos del material aportado.

El objetivo principal de esta tesis doctoral es establecer métodos y procedimientos para la fabricación de componentes de Inconel 718 mediante aporte láser, empleando para ello una máquina híbrida que combina dos procesos aditivos: el aporte por láser de polvo metálico y el mecanizado (fresado y torneado). Estos métodos y procedimientos se integrarán en la máquina híbrida del fabricante IBARMIA 'ZVH45 / 1600 Add + Process', que ha sido la 3ª máquina híbrida en salir al mercado y que está disponible en las instalaciones de Tecnalía.

Para alcanzar este objetivo, los objetivos concretos que ha perseguido este trabajo son:

1. Obtener una ventana optimizada de parámetros con el fin de aumentar la eficiencia, calidad y tasa de material aportado durante el proceso de aporte.
2. Desarrollar un modelo geométrico que, teniendo en cuenta los parámetros principales del proceso (potencia del láser, avance del cabezal y flujo másico del polvo inyectado), el tipo de boquilla y disposición de trabajo (aporte con el cabezal vertical o inclinado en superficie vertical o inclinada), permita predecir la geometría del material aportado incluyendo la dilución geométrica.
3. Valorar la efectividad del modelo al ser utilizado en otros materiales que el estudiado en esta tesis.
4. Desarrollar la estrategia de aporte óptima para recubrimientos y estructuras multicapa y validarla mediante la fabricación de geometrías complejas.
5. Generar un algoritmo para crear trayectorias de aporte optimizadas que tengan en cuenta el modelo y las estrategias desarrolladas a lo largo de esta tesis, y utilizar y validar este algoritmo para la fabricación de una sección de la carcasa de una turbina de baja presión del sector aeronáutico.

3 Organización del Trabajo de Tesis Doctoral

Con el fin de abordar de una manera estructurada los objetivos tecnológicos que se han presentado en el apartado anterior, el presente trabajo de Tesis Doctoral se ha estructurado de la siguiente manera:

1. En el primer capítulo se ha presentado el contexto tecnológico e industrial actual de la fabricación aditiva, así como los objetivos de esta tesis.
2. En el segundo capítulo, tras explicar en qué consiste el proceso, se realiza una revisión bibliográfica que resume el estado del arte del proceso de aporte por láser, así como del mecanizado de componentes fabricados con esta tecnología, y la hibridación de ambos procesos en una sola máquina. En segundo lugar, tras explicar las características y aplicaciones de las superaleaciones se realiza una revisión bibliográfica que resume el estado del arte del aporte láser utilizando como material Inconel 718 en polvo y su posterior mecanizado.

3. En el tercer capítulo se describen todos los estudios experimentales realizados para caracterizar el proceso y obtener la ventana de parámetros optimizada, así como los métodos y procedimientos empleados para su implementación en una máquina híbrida.
4. En el cuarto capítulo se describe el modelo geométrico semi-empírico desarrollado para la predicción de las características de los recubrimientos (espesor, ondulación, dilución, etc.) y su validación tanto con Inconel 718 como con Eutroloy 16606A.04. También se describe un algoritmo de fabricación de estructuras de sección variable y diversas estrategias de aporte desarrollados a partir del modelo geométrico.
5. En el quinto capítulo se valida tanto el modelo como el algoritmo y las estrategias de aporte en un caso complejo como es la fabricación de carcassas de turbinas de baja presión.
6. En el sexto y último capítulo se presentan las principales aportaciones que realiza este trabajo de investigación sobre el estado del arte, así como las líneas de investigación que se abren con el mismo de cara al futuro.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica de los trabajos relacionados con la fabricación híbrida de componentes mediante la combinación de Fabricación Aditiva y Fabricación Sustractiva, centrandolo el estudio en la tecnología DED (Directed Energy Deposition) por láser (Light amplification by stimulated emission of radiation) aportando polvo metálico. En primer lugar, y con el objetivo de realizar una introducción, se realiza una descripción de esta tecnología, así como de los parámetros principales del proceso, equipos, materiales, modelización y control utilizados dentro de este proceso. En segundo lugar, se resumen las aplicaciones existentes de esta tecnología utilizando la superaleación 718 de base níquel, material que se ha utilizado para la realización de este trabajo de tesis doctoral.

1 Proceso DED basado en láser y polvo metálico

El proceso de fabricación aditiva DED [ISO 52900, 2017] consiste en la utilización de una fuente térmica focalizada (láser, haz de electrones o plasma) para unir materiales metálicos mediante fusión a medida que se aportan. Esta técnica permite recubrir o generar estructuras sobre un sustrato o material base sobre el que se deposita/aporta el mismo u otro material que puede ser suministrado tanto en polvo como en hilo.

Esta tesis está centrada en el proceso aditivo DED utilizando un láser como fuente de energía e inyectando polvo metálico en el baño fundido generado (Figura II-1). En el caso de que la aplicación del proceso sea la de recubrir superficies se puede utilizar también el término laser cladding que aparece definido dentro de la norma ISO para procesos de proyección térmica [ISO 14917, 2017].

En este proceso, el láser genera un baño fundido en el sustrato sobre el que se va depositando el metal en polvo que es inyectado mediante un gas inerte (argón o nitrógeno generalmente) generando una unión metalúrgica de gran calidad libre de poros, grietas o deformaciones [Toyserkani, 2004]. Para evitar que se produzcan reacciones exotérmicas de oxidación durante el proceso que puedan dañar el equipo y/o la calidad del material aportado es necesario que el proceso se realice dentro de una atmosfera protectora libre de oxígeno.

El aporte láser permite fabricar piezas “near net shape”, es decir, componentes cercanos a las dimensiones finales, quedando solo un proceso de acabado posterior, por lo que se produce un ahorro de todo el material desechado en las

operaciones de mecanizado de desbaste. Este hecho, combinado con una fabricación con una alta eficiencia de aporte, puede suponer un ahorro significativo en residuos asociados al proceso de mecanizado (virutas, herramientas, taladrina, etc.) aunque genera como residuo el polvo metálico que no se ha aportado en el proceso y cuya cantidad dependerá de la eficiencia del proceso.

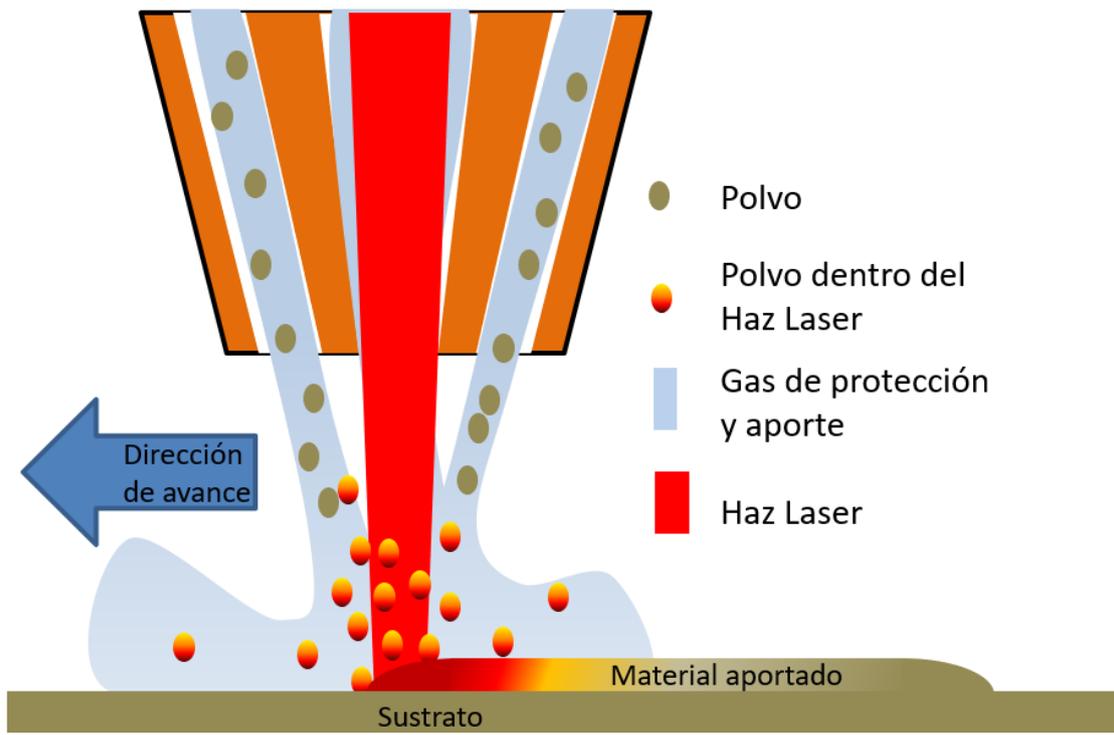


Figura II-1: Esquema del proceso DED, utilizando como fuente de energía un láser e inyectando polvo metálico.

1.1 Parámetros del proceso de aporte

Características como la calidad (poros, grietas y tensiones residuales), la geometría, la eficiencia, la productividad, la estructura y las propiedades mecánicas obtenidas durante el proceso de aporte dependen de la correcta selección de múltiples parámetros (Figura II-2). Sin embargo, la gran mayoría dependen del equipo que se esté utilizando y de decisiones previas al proceso de aporte por lo que, una vez establecidas, se pueden considerar como parámetros principales la potencia láser (P), la velocidad de avance (v) y el flujo másico de polvo (\dot{m}_p).

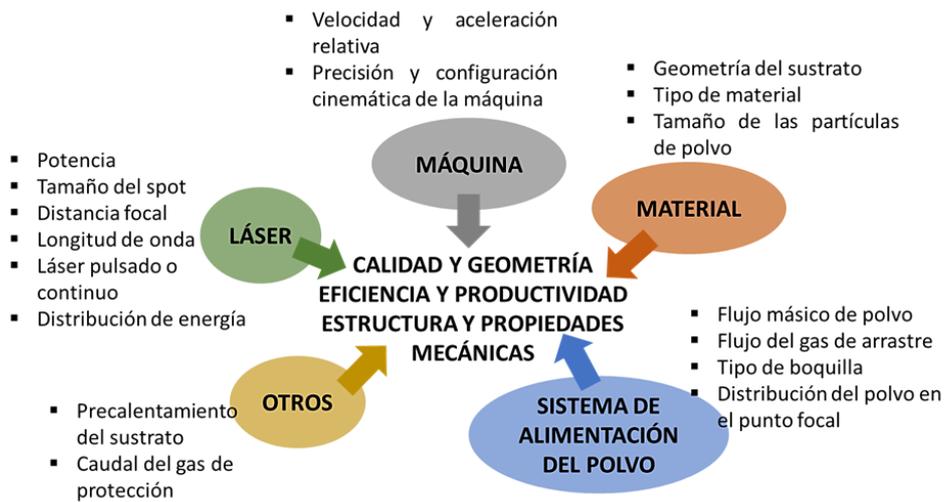


Figura II-2. Parámetros que afectan al proceso de aporte [Toyserkani, 2004].

En la bibliografía abundan los estudios sobre la relación que tienen los parámetros principales (potencia Laser, velocidad de avance y flujo másico de polvo) en las características principales del cordón aportado: altura (h), área (A), anchura (w), penetración (p), etc. Estos estudios tienen como objetivo crear un “mapa” de parámetros óptimos del proceso de aporte del cordón individual [de Oliveira, 2005] y se utiliza para seleccionar los parámetros al aportar geometrías más complejas [Jinoop, 2019]. Aparte de las características geométricas del cordón individual, también se estudian propiedades mecánicas como la dureza [El Cheikh, 2012-a]. Estos estudios establecen un punto de partida en el estudio de recubrimientos y de la fabricación aditiva de estructuras ya que reducen el rango de valores de los parámetros principales, pero no excluyen ni de tener que hacer pruebas adicionales en cada aplicación ni de estudiar la influencia de otros parámetros (e.g. el porcentaje de solapamiento entre cordones en recubrimientos).

La gran mayoría de trabajos obtienen relaciones entre la altura, anchura y área del cordón y los parámetros principales que se pueden resumir en una ecuación (Eq. 1).

$$\text{Característica del cordón} = P^{exp1} \cdot v^{exp2} \cdot \dot{m}_p^{exp3} \quad \text{Eq. 1}$$

Sin embargo, la relación entre los parámetros y las características obtenidas en el cordón aportado se basa en ejercicio puramente experimental por lo que está muy ligada al equipo utilizado y a la combinación de materiales empleada. Así, a pesar de que la mayoría de los trabajos coinciden en la tendencia, pocos coinciden en el valor [Bax, 2018]. La Tabla II-1 presenta valores de los exponentes encontrados en la bibliografía.

Tabla II-1. Resumen de exponentes resultantes en diversos trabajos encontrados por Bax et al. [Bax, 2018].

Característica	Exponente de potencia (^{exp1})	Exponente de la velocidad (^{exp2})	Exponente del flujo de polvo (^{exp3})
h (mm)	0; 0,25; 0,5; 2	-1; -1,5	0,5; 0,75; 1
w (mm)	0,75; 1; 1,5	-0,5; -0,33; 0,25	0
A (mm ²)	0,5; 1	-1; -1,5	1

En general, la mayoría de los estudios coinciden en que la potencia del láser tiene una mayor influencia que el resto de los parámetros sobre la anchura mientras que la velocidad tiene una mayor influencia que el resto de los parámetros sobre la altura y el área del cordón aportado.

1.2 Estrategia de aporte

La estrategia de las trayectorias de aporte y la distancia de aporte son otras variables que controlar, ya que afectan significativamente al resultado del proceso. La estrategia depende fuertemente de la configuración cinemática de la máquina [Cortina, 2018-a] y del tipo de cabezal. El proceso también presenta singularidades con respecto a las trayectorias de mecanizado que dan lugar a una serie de reglas distintas que deben cumplir las trayectorias de aporte. La dirección de aporte marca las propiedades del material anisotrópico aportado [Tabernero, 2011] y la calidad de la geometría obtenida que puede presentar deformaciones y falta de llenado dependiendo de la estrategia utilizada [Kono, 2018]. Las trayectorias utilizadas provienen de CAMs de mecanizado, aunque ya se van incorporando programas y módulos específicos. Es típico utilizar otros programas para adaptar la trayectoria generada por el CAM a la realidad del proceso de aporte, a los sistemas de control utilizados [Garmendia, 2018] y a cada aplicación de uso [Flores, 2019].

La distancia de focalización del haz láser y del flujo de polvo sobre el sustrato también influyen en los defectos de crecimiento en una estructura multicapa, pero muchos autores coinciden que su efecto en la eficiencia del proceso requiere un estudio más profundo [Zhu, 2012]. Tampoco está claro cómo afecta la inclinación de la superficie o del cabezal al proceso de aporte, aunque ya hay trabajos que estudian su efecto en la geometría del cordón individual [Hao, 2019].

1.3 Materiales

Existe un gran número de materiales que pueden ser utilizados en procesos de aporte por láser, aunque los más comunes son aleaciones de base hierro, base níquel y base cobalto. Como norma general, se puede afirmar que los materiales

que presentan mayor soldabilidad son los más adecuados para su empleo en el proceso láser DED. Muchos de ellos son los mismos que se utilizan en los procesos de proyección térmica lo que aumenta notablemente la cantidad de materiales que pueden ser utilizados. El tamaño de partícula del polvo utilizado en el proceso DED suele estar en un rango de 45 a 150 μm , lo que coincide con el rango empleado en muchos procesos de proyección térmica.

1.3.1 Características del polvo metálico

La esfericidad, el tamaño y la homogeneidad del tamaño de la partícula son características importantes que definen la correcta fluidez del flujo de polvo, aunque también marcan grandes diferencias de precio entre proveedores. Cuanto más esférica sea la partícula menor será el rozamiento de esta con los diversos elementos que se encuentre en su recorrido hasta el cabezal y también será menor el rozamiento entre las propias partículas. Suponiendo que la partícula tiene forma esférica, cuanto menor sea el tamaño mayor es el área de arrastre dentro del flujo de gas con respecto al peso de la partícula. Esto es debido a que, a menor radio, mayor es el área de la esfera (A_E) con respecto al volumen de esta (V_E) y, por tanto, respecto al peso (Eq. 2).

$$\frac{A_E}{V_E} = \frac{4\pi r^2}{\left(\frac{4\pi r^3}{3}\right)} = \frac{3}{r} \quad \text{Eq. 2}$$

Por último, cuanto más homogéneo sea el tamaño y la forma de las partículas, más homogéneo será el flujo ya que la fuerza de arrastre del flujo de gas será similar en todas las partículas. En la Figura II-3 se observan dos muestras de polvo con granulometrías similares, pero con características muy dispares.

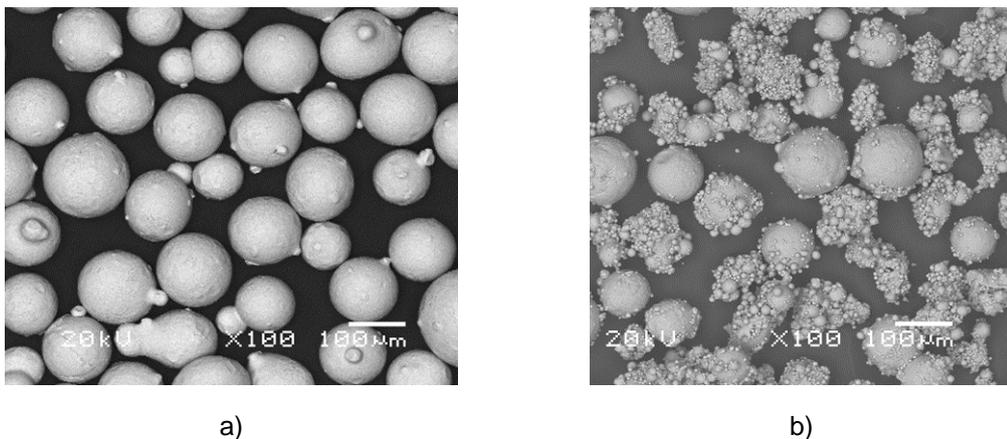


Figura II-3: Imágenes obtenidas por MEB. a) Distribución de partículas esféricas; b) Distribución de partículas irregulares y satélites.

Además de las características comentadas, también hay que tener en cuenta las fuerzas que actúan sobre las partículas y que pueden afectar negativamente al flujo. Estas fuerzas son la gravedad, fuerzas de fricción, fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, capilaridad y fuerzas hidrodinámicas. Actualmente existen empresas [GRANUTOOLS, 2020] que suministran equipos para la medición de los efectos de estas fuerzas en las propiedades reológicas de diversos materiales incluidos los que se utilizan en procesos de fabricación aditiva [Yablokova, 2015], principalmente para procesos PBF (Powder Bed Fusion).

En la actualidad, y debido al auge de los procesos de Fabricación Aditiva que emplean polvo metálico, el número de empresas y el tamaño de éstas se ha visto incrementado. Así, algunos ejemplos de empresas que suministran polvo metálico para aplicaciones de fabricación aditiva, incluyendo el aporte por láser son Flame Spray Technologies [FST, 2019], Castolin Eutectic Group [CASTOLIN, 2019], Wall Colmonoy Corporation [WC, 2019], ATI metals [ATI, 2020], Oerlikon Metco [METCO powder, 2020], Höganäs [HÖGANÄS, 2019], H.C.Starck [H.C.STARCK, 2020], Erasteel, Inc. [ERASTEEL, 2019], Sandvik Group [SANDVIK, 2019], TLS Technik GmbH & Co. Spezialpulver KG [TLS, 2020], AP&C Powder Metallurgy [AP&C, 2020] y Carpenter Additive [CARPENTER, 2020].

1.3.2 Aspectos relacionados con la Seguridad y Riesgos para la Salud

Desde el punto de vista de la seguridad, el contacto o la inhalación del polvo metálico tiene riesgos para la salud del operario dependiendo del material, concentración ambiental y del tiempo de exposición. Los diversos riesgos asociados a la manipulación y procesamiento pueden ser obtenidos en las fichas internacionales de seguridad química de las sustancias metálicas con las que se estén trabajando. Estas fichas detallan riesgos físicos, químicos y límites de exposición recomendados por el Comité Internacional de Expertos del IPCS (*International Programme on Chemical Safety*), así como las medidas de prevención necesarias. Estas fichas deben ser entregadas por los distribuidores si se les solicitan según constata la *European Chemicals Agency* [ECHA info, 2020]. Como norma general, se establece el uso de guantes, mascarilla con filtro para partículas, gafas protectoras y sistemas de almacenamiento adecuados para evitar riesgos innecesarios al manipular estas sustancias. Los riesgos asociados al proceso de aporte (tales como vapores tóxicos o riesgo de deflagración del material) también son tratados y es necesario tomar medidas y equipamiento apropiado ante estos peligros.

Los riesgos más comunes de los materiales metálicos en polvo se clasifican en sustancia nociva e irritante tanto por contacto cutáneo, ojos e inhalación, pudiendo ser además inflamables como el aluminio o cancerígenos como el níquel (Figura II-4).

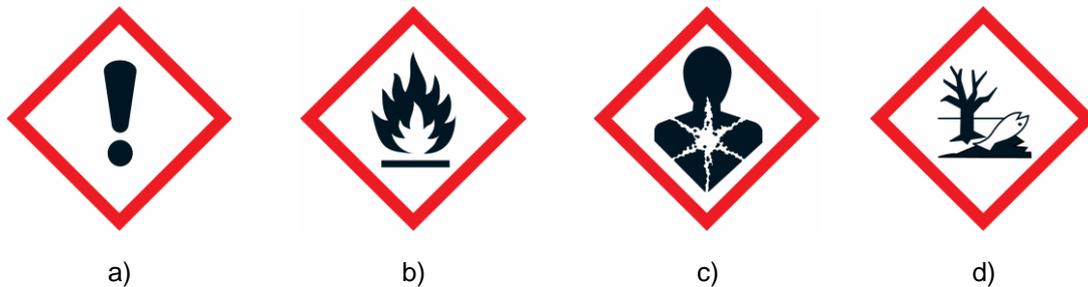


Figura II-4: Símbolos de sustancias peligrosas, a) Sustancia tóxica, irritante, narcótica, peligrosa; b) Sustancia inflamable; c) Sustancia peligrosa para el cuerpo, mutágeno, carcinógeno, reprotóxico; d) Sustancia dañina para el medio ambiente

Por tanto, es necesario el desarrollo de un sistema de recogida y limpieza del polvo sobrante en el proceso que evite la suspensión de partículas en el aire y limpie completamente la máquina de cualquier resto depositado para desarrollar un entorno laboral seguro.

Por último, y a pesar de los riesgos mencionados, es importante recalcar que la granulometría del polvo empleado en las operaciones de Láser DED es mayor al de otros procesos de Fabricación Aditiva (PBF o Binder Jetting), por lo que su filtrado, recogida y manipulación es más sencillo.

1.4 Aplicaciones industriales

A pesar de que puede haber una alta dispersión en las aplicaciones y sectores industriales que emplean el proceso de aporte por láser, las aplicaciones de esta tecnología pueden englobarse en 3 grupos:

- Fabricación 3D de componentes y/o detalles
- Recubrimientos
- Reparación de componentes

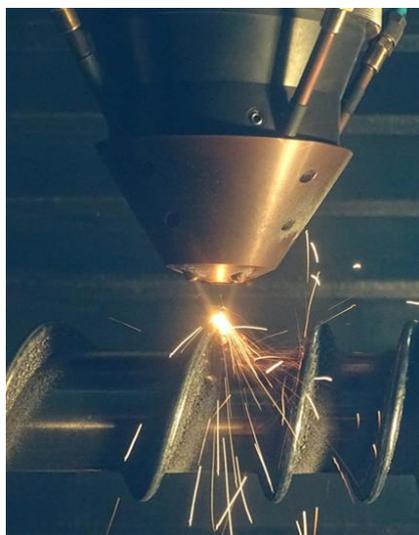
1.4.1 Fabricación 3D de componentes y/o detalles

La fabricación de componentes por aporte láser de polvo metálico es una aplicación que queda restringida a series cortas de alto valor añadido y prototipos y que tiene como principales competidores, dentro de la fabricación aditiva, a procesos de aporte por cama de polvo PBF y a la tecnología WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). La tecnología PBF permite producir geometrías mucho más complejas, pero con poca eficiencia de material aportado, tamaño de piezas

limitado, una productividad más baja y no se puede integrar en un robot o máquina herramienta. En cambio, el proceso WAAM aprovecha el 100% del material, con tasas de aporte de material superiores a $10 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ (dependiendo del material y del equipamiento) aunque la dilución es mayor y la flexibilidad de trayectorias y geometrías es más limitada. La tasa de aporte estándar en el aporte láser de polvo metálico para esta aplicación es muy inferior ($< 1 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$). Esta aplicación también permite cambiar la estrategia de fabricación de un componente, pudiéndose realizar por DED detalles de la geometría sobre un componente en vez de fabricar o mecanizar la pieza entera (Figura II-5.a).

1.4.2 Recubrimientos

La aplicación de recubrimientos (Figura II-5.b) permite recubrir zonas de piezas con otros materiales, mejorando sus propiedades, alargando su vida útil y protegiéndolas frente a desgaste y corrosión (como ejemplo las zonas de contacto eje-cojinete o las partes sometidas a mayor desgaste en tornillos de extrusión). La única condición que se debe cumplir es que sustrato y aporte sean soldables. Como el aporte térmico de este método es muy inferior al de otros procesos como WAAM y soldadura TIG/MIG/MAG, se produce una menor dilución entre aporte y sustrato por lo que el material añadido mantiene correctamente sus propiedades.



a)



b)

Figura II-5. Ejemplos de aplicaciones. a) Fabricación aditiva de los filetes de un eje extrusor; b) Recubrimiento y reparación de un taco de estampación.

Esto permite obtener recubrimientos de alta calidad y con combinaciones de materiales que con otros métodos no son posibles. Actualmente hay empresas que comercializan equipos para recubrimiento de superficies de revolución por aporte láser con tasas de producción cercanas a los procesos de proyección

térmica y superiores a WAAM. Un ejemplo es la solución COAXpowerline [COAX, 2019] de la empresa Fraunhofer desarrollada dentro del proyecto SPRAYENERGY [SPRAYENERGY, 2010] con tasas superiores a $18 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ aportando Inconel 625.

1.4.3 Reparación de componentes

La reparación de componentes metálicos (Figura II-5.b) es una aplicación que permite alargar la vida útil de un componente dañado al poder añadir material y mecanizarlo para recuperar las dimensiones iniciales de la pieza manteniendo o mejorando las propiedades mecánicas. Un ejemplo de esta aplicación sería la reparación de dientes de engranajes, husillos, herramientas de mecanizado, moldes y matrices. En muchos casos, la reparación de componentes todavía es un trabajo manual con la necesidad de operarios altamente cualificados. La reparación por aporte láser es una alternativa ya que obtiene una gran calidad en el material aportado y muestra una gran capacidad de automatización para el proceso de reparación.

1.5 Sectores industriales

Las aplicaciones de la fabricación aditiva por aporte láser están presentes en gran variedad de sectores industriales siendo mayoritariamente empleadas las aplicaciones de recubrimiento y reparación debido, principalmente, a la gran variedad de materiales que se pueden emplear y las buenas propiedades del material aportado. La Tabla II-2 muestra algunos ejemplos. Así pues, es común el uso de esta tecnología en aplicaciones de reparación y recubrimiento para sectores tales como el de matrices y moldes [Lu, 2019-a], el sector de la valvulería industrial [Ding, 2017] y el sector de la fabricación de maquinaria [Stoffel, 2015]. El objetivo principal es el de mejorar las propiedades a desgaste y corrosión de un sustrato fabricado generalmente con un material base hierro aportando materiales base hierro con mejores prestaciones a desgaste abrasivo o aleaciones base cobalto o níquel para evitar la corrosión u otros mecanismos de desgaste como la adhesión. En el sector de la fabricación de maquinaria también se pueden encontrar aplicaciones de fabricación 3D de detalles de un componente como, por ejemplo, los dientes de un engranaje de maquinaria pesada [Stadtfeld, 2016].

También el sector aeronáutico y el sector sanitario apuestan mayoritariamente en la misma línea de aplicaciones de reparación y recubrimiento mediante aporte láser DED empleando superaleaciones base níquel [Kaierle, 2017] y titanio [Ke, 2019].

El sector petroquímico también apuesta por las aplicaciones de recubrimiento y reparación de componentes, aunque al aporte de superaleaciones también hay que añadir el aporte de aceros inoxidable martensíticos [Lei, 2017].

Por su parte, el sector de la automoción presenta una aplicación exótica como puede ser la soldadura de planchas de acero. Esto es debido a que la soldadura convencional presenta silicatos que generan problemas durante el posterior pintado de las planchas [Hanschmann, 2013].

Tabla II-2. Ejemplos de aplicaciones por sectores industriales

Sector	Material	Aplicación
	Sustrato: H13 // Material: WC+Fe104.	Recubrimiento de moldes y matrices [Lu, 2019-a].
	Sustrato: Acero 316 // Material: Aleaciones de base cobalto Stellite 6, 3 y 21.	Recubrimiento de válvulas [Ding, 2017].
	Sustrato: Acero al carbono // Material: Metal vítreo FeCrW	Recubrimiento de cuchillas de maquinaria [Stoffel, 2015].
	Sustrato: Planchas de acero // Material: Acero y níquel	Soldadura de planchas de acero en la industria automotriz [Hanschmann, 2013].
	Aceros aleados; Sustrato: FV520B // Material: FeCrNiCu	Reparación de impulsores para la industria petroquímica [Lei, 2017].
	Tanto sustrato como material son la superaleación monocristal de base níquel CMSX-4	Reparación de álabes para la industria aeronáutica [Kaielerle, 2017].
	Multimaterial (aunque sustrato y material aportado son el mismo).	Fabricación 3D de dientes de engranajes [Stadtfeld, 2016]
	Sustrato: Ti-6Al-4V // Material: Ti6Al4V+HA	Recubrimiento de implantes metálicos [Ke, 2019]

1.6 Estructura y características mecánicas

La estructura macroscópica obtenida depende principalmente de la temperatura alcanzada durante el proceso y de la velocidad de enfriamiento del baño fundido. En esto influyen los parámetros principales del proceso de aporte, pero dependiendo del material a aportar y la estructura que se quiera obtener se puede acelerar o frenar dicha velocidad. La velocidad de enfriamiento del proceso ya es de por sí rápida, estando normalmente en el rango de $1000\text{-}6000^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ [Wang, 2009]. Sin embargo, si se utiliza un láser pulsado [Farnia, 2013] o se refrigera la base del sustrato [Chen, 2016] puede aumentar considerablemente. La estructura del material aportado suele ser columnar dendrítica o una combinación equiaxial-columnar dendrítica (Figura II-6) siendo necesario aumentar la velocidad de enfriamiento si se pretende obtener estructuras monocristalinas [Kurz, 2001] mediante aporte láser [Rottwinkel, 2014].

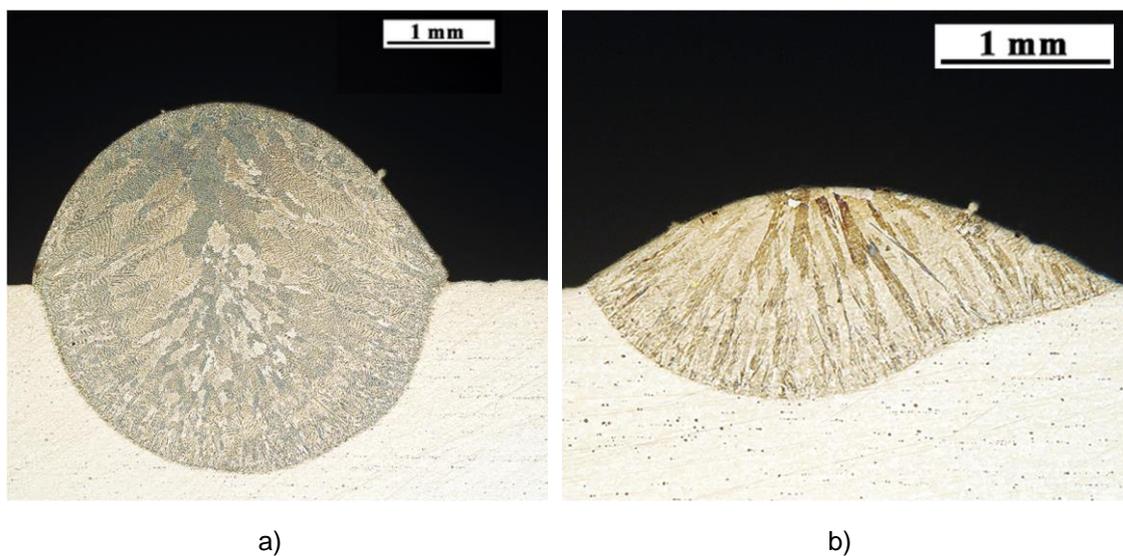


Figura II-6. Estructuras de la sección transversal de cordones de Inconel 718 aportado por láser con diferentes parámetros. a) Columnares dendríticos con presencia de granos equiaxiales; b) Granos columnares dendríticos orientados en la dirección del gradiente térmico.

Las estructuras equiaxiales puras presentan isotropía en sus propiedades mientras que las propiedades mecánicas en las estructuras columnares son anisotrópicas, presentando mejores propiedades en la dirección del crecimiento de grano. Hay que tener en cuenta que el grano crece en 3 dimensiones siguiendo el gradiente de temperatura (Figura II-7), por lo que la estructura equiaxial que aparece en la sección transversal del material aportado puede resultar no serla [Ocelík, 2010].



Figura II-7. Marcas de enfriamiento siguiendo el gradiente de temperatura en AISI 316L.

Otro método para influir en la velocidad de enfriamiento es precalentar el sustrato para obtener velocidades de enfriamiento bajas. El objetivo de este tratamiento térmico es evitar la aparición de grietas debidas a las tensiones residuales [Sridharan, 2019]. Estas grietas suelen aparecer en materiales con distintas temperaturas de fusión y diferentes coeficientes de dilatación por lo que se generan dislocaciones importantes en la estructura durante la solidificación (Figura II-8). Precalentar el sustrato alivia tensiones residuales en el sustrato y aumenta el tiempo que tiene la red cristalina para reordenarse durante el aporte, disminuyendo la cantidad de dislocaciones y evitando la aparición de grietas durante la solidificación.



Figura II-8. Grieta en recubrimiento de base níquel Colmonoy 56P2 sobre acero 42CrMoS4 sin precalentar.

La composición química resultante en la zona de la dilución entre aporte y sustrato es también clave en las propiedades ya que una dilución excesiva entre

dos materiales distintos puede generar intermetálicos que reduzcan las propiedades mecánicas del material aportado.

En cuanto a las propiedades mecánicas del material aportado por DED, suele presentar las siguientes generalidades:

- Una tensión de rotura anisotrópica [Carroll, 2015], de menor valor comparada con el mismo material forjado.
- Una ductilidad muy reducida presentando rotura frágil sin apenas elasticidad [Roy, 2019].
- Una mayor dureza que el mismo material forjado [Telasang, 2014] debido a la estructura columnar y a las tensiones residuales de compresión.
- Una buena resistencia a desgaste [Xu, 2014] siendo una técnica ampliamente utilizada para aplicar recubrimientos (Figura II-9).
- Su resistencia a fatiga es menor que el mismo material forjado [Chew, 2017] debido a microdefectos, tensiones residuales, anisotropía en las propiedades mecánicas y una elongación elástica menor que acelera la propagación de las grietas.

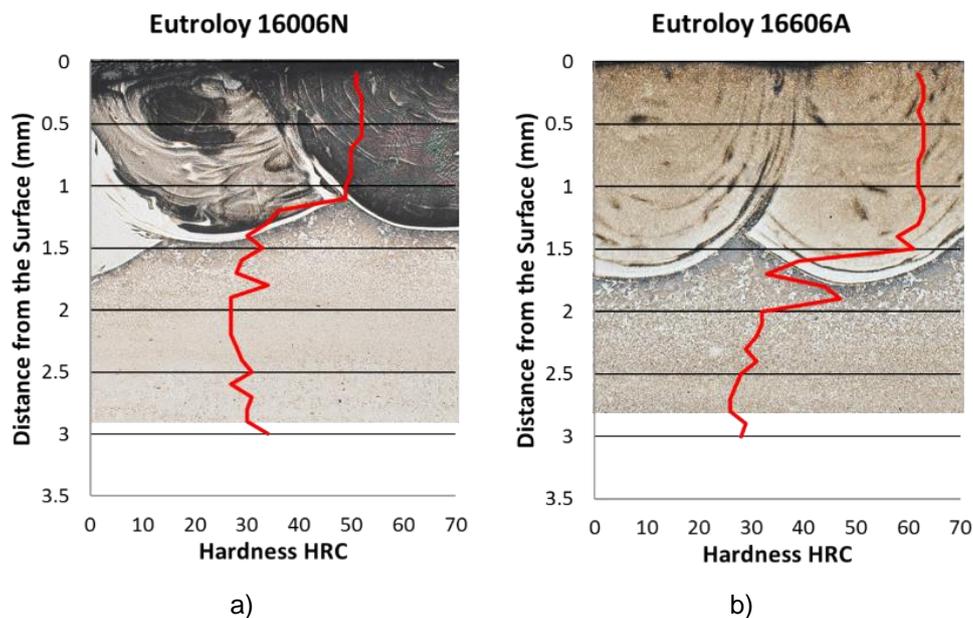


Figura II-9. Perfiles de durezas Rockwell de diferentes materiales aportados sobre sustrato de acero 42CrMoS4 sin templar. a) Eutroloy 16006N; b) Eutroloy 16606A.

Por lo tanto, en general es necesario aplicar tratamientos térmicos posteriores al aporte, con el objetivo de homogeneizar y mejorar las propiedades del material aportado [Sun, 2014].

1.7 Post-procesado del material aportado por DED

Debido a las propiedades del material y al acabado que se obtienen tras el aporte de material por DED, y una vez acabado el proceso de aporte, en general hay que aplicar dos etapas de post-procesado: la etapa de tratamientos térmicos y la etapa de mecanizado.

En función de la porosidad, de las tensiones residuales y de la estructura y características que se deseen conseguir, se pueden aplicar diferentes tratamientos térmicos. Estos, se han de dividir en dos tipos: los de corrección de defectos y los de mejora de las características mecánicas y estructura de grano.

La aplicación de tratamientos de corrección de defectos depende de la calidad del aporte y de las características que se busquen en el material. Estos tratamientos suelen ser HIP (Hot Isostatic Pressure) para eliminar poros [Hrabe, 2017] y tratamientos térmicos para la relajación de las tensiones residuales con el fin de aumentar la resistencia a fatiga [Cottam, 2013].

El tipo de tratamiento térmico para la mejora de propiedades depende de las características que se busquen en el material aportado. Estos tratamientos son principalmente tratamientos de homogeneización del grano y temple [Zhang, 2017]. La homogeneización del grano obtiene isotropía en las propiedades y aumenta la ductilidad del material por lo que aumenta su resistencia a fatiga. Por su parte, el temple busca aumentar la dureza del material y mejorar las propiedades mecánicas.

En cuanto a la etapa de mecanizado, es una etapa es obligatoria. El tipo de superficie generada en el proceso de aporte es un foco de concentración de tensiones, propagación de grietas y rozamientos indeseados [Javidi, 2008] independientemente de la tolerancia geométrica que deba cumplir [Fatemi, 2017]. Debido a las características y cantidad del material aportado el mecanizado se realiza mediante procesos de semi-acabado y acabado en condiciones más exigentes que un material simplemente mecanizado [Calleja, 2018]. Uno de los problemas que da el mecanizado del material aportado es que no se conoce la geometría real del material aportado y que va a ser mecanizado. El material aportado presenta dimensiones aproximadas a lo esperado, pero con una superficie irregular con alta rugosidad, con alta ondulación [Gharbi, 2013] y con sobreesesores variables que generan esfuerzos variables en la herramienta [Ostra, 2019]. Esto puede provocar un mecanizado de baja calidad con consecuencias graves en las características mecánicas del material, mayor desgaste en la herramienta de corte y una peor calidad superficial que puede reducir la resistencia a fatiga del componente [Bayoumi, 1995].

2 Equipo del proceso de aporte láser de polvo metálico

Este tipo de proceso requiere de 4 elementos principales comunes: generador láser, cabezal láser, alimentador de polvo y la configuración cinemática de la máquina. Sin embargo, las opciones comerciales que hay dentro de cada uno de esos elementos definen el campo de aplicación y limitaciones de cada equipo.

2.1 Generador Láser

El láser es un haz luminoso de una sola frecuencia (monocromático), monodireccional, coherente y muy intenso, producido por la estimulación eléctrica o térmica de los átomos, moléculas o iones de un material. Estas características del haz dependen del resonador, un elemento que transforma la energía suministrada (mediante una fuente lumínica o eléctrica) en un haz de luz con la misma longitud de onda y que forma parte del generador láser. Como parte de la energía producida en el equipo se pierde en forma de calor, el generador láser debe llevar como equipo auxiliar un refrigerador por agua.

Donde radica la verdadera importancia del tipo de resonador es en el valor de la longitud de onda generada ya que dependiendo de cuál sea, se podrá utilizar de manera efectiva con unos materiales u otros. Además, dependiendo del tipo de resonador será posible transportar el haz láser al cabezal de aporte mediante fibra óptica lo que permite separar este elemento de gran volumen del resto del equipo.

Sin extenderse en los distintos subgrupos, existen tres tipos básicos de generadores láser para este tipo de aplicaciones:

1. Láser de CO₂: El resonador utiliza una mezcla gaseosa de CO₂, He y N₂. En estos generadores no es posible guiar el láser mediante fibra.
2. Láser de estado sólido: El resonador es un material cristalino excitado mediante una fuente luminosa (lámpara o diodo).
3. Láser de Diodo: El resonador es un material semiconductor excitado por impulsos eléctricos.

La cantidad de energía láser que puede absorber un material depende principalmente de su longitud de onda. Esta propiedad del haz láser limita fuertemente el rango de materiales que se pueden procesar (Figura II-10).

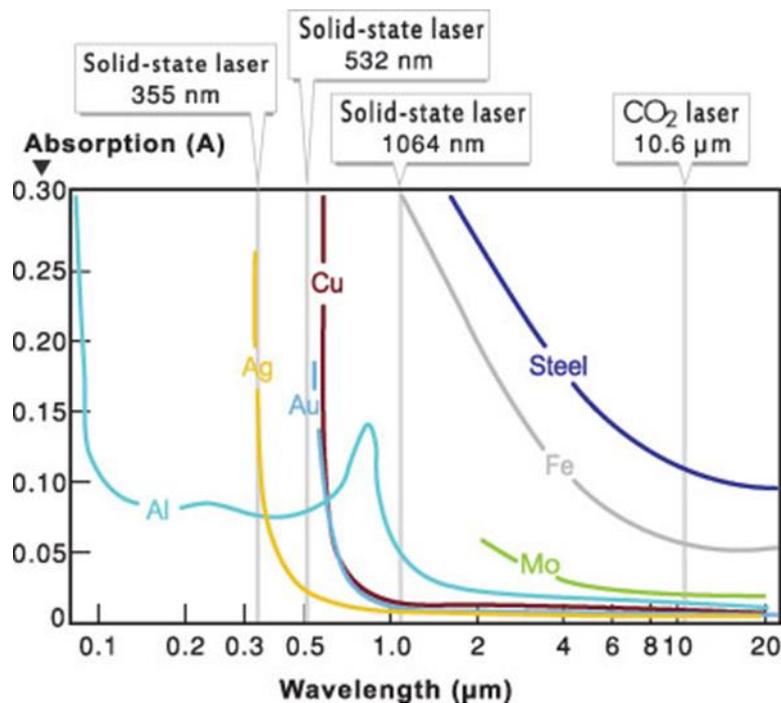


Figura II-10: Factores de absorción para diferentes materiales dependiendo de la longitud de onda [Kaminski, 2011].

La parte reflejada del haz láser es la otra cara de la moneda dentro de este proceso. Por ejemplo, la absorción media de un acero convencional ronda el 40% para un láser con una longitud de onda de 1,064 μm siendo algo menor para aleaciones de base níquel y siendo menor del 5% para aluminio, cobre, oro o plata (Figura II-10). El haz láser no absorbido genera reflexiones aleatorias y de gran alcance durante el proceso pudiendo provocar daños en el equipo y personales de extrema gravedad (quemaduras en la piel y lesiones en la córnea). Por tanto, es necesario la implementación de medidas de protección especiales, tales como un cerramiento eficiente del espacio de trabajo del láser que evite la salida de las reflexiones fuera de la máquina. También son necesarios cristales y gafas absorbentes de las radiaciones con las que se trabaja (incluyendo las residuales).

Estas medidas deberán ser más extremas con los metales de mayor reflexión debiendo tomarse medidas adicionales o incluso prohibir el uso de tales materiales.

Algunos ejemplos de empresas que suministran generadores láser para aplicaciones de fabricación aditiva son Coherent [COHERENT, 2019], Trumpf [TRUMPF, 2020], Laserline [LASERLINE, 2019] e IPG Photonics Corporation [IPG, 2019].

2.2 Cabezal láser

En este elemento es donde se encuentran las ópticas que concentran la energía del haz láser del generador y los inyectores por donde se aporta el polvo metálico. Al igual que el generador, necesita de un refrigerador por agua como equipo auxiliar con el fin de proteger fibra, óptica e inyectores del calor producido durante el proceso de aporte. Aunque existen muchos parámetros para definir el campo de aplicación del cabezal láser, caben destacar cuatro: i) la densidad de energía del haz láser; ii) la distribución de energía; iii) Beam Parameter Product (BPP); y iv) el tipo de cabezal láser.

2.2.1 Densidad de energía del haz láser

Al salir de las ópticas, el haz láser converge en un punto de diámetro mínimo denominado punto focal para luego volver a divergir (Figura II-11.a). En ese punto, la densidad de energía es máxima lo cual es perfecto para operaciones de corte donde el material debe ser vaporizado. Sin embargo, en los procesos de fabricación aditiva la densidad de energía necesaria es menor que en otros procesos (Figura II-11.b) por lo que puede ser necesario aumentar el diámetro del haz para obtener la densidad de energía adecuada. Debido a la divergencia, el haz láser proporciona múltiples diámetros y densidades de energía dependiendo de la distancia focal.

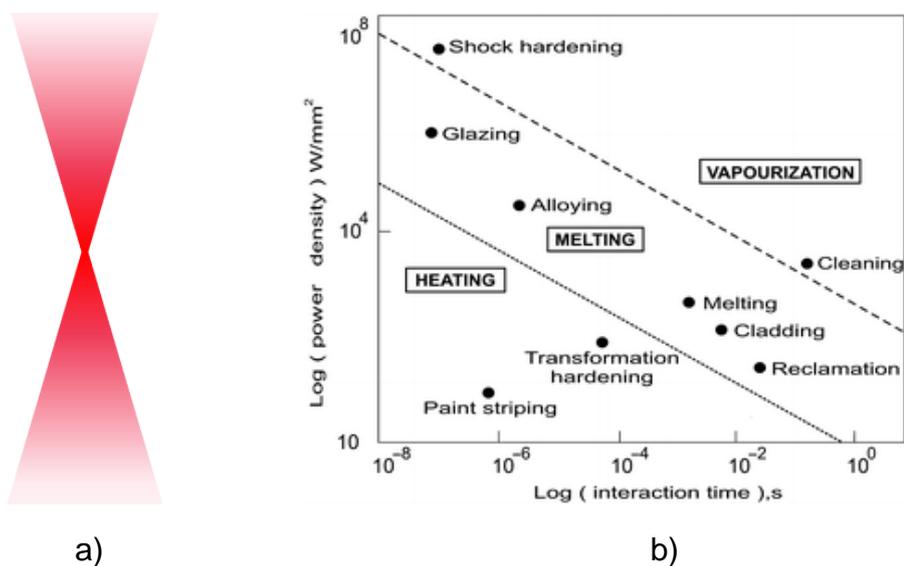


Figura II-11: a) Representación del punto focal del haz láser (zona de máxima convergencia); b) Rango de trabajo de distintos procesos láser [Majumdar & Manna, 2011].

2.2.2 Distribución de energía

Es la forma que se divide la energía del haz en secciones transversales al eje de este. Hay 4 distribuciones básicas (Figura II-12):

1. Gaussiana: la sección transversal es circular con una densidad de energía que aumenta según se acerca hacia el centro del haz. Es la que presenta el menor punto focal y la mayor divergencia. Es una distribución típica en aplicaciones de corte por láser.
2. Toroidal: La sección transversal es circular, pero la densidad máxima está distribuida en un anillo concéntrico al centro del haz.
3. Multimodo: Este nombre abarca distribuciones de energía obtenidas por combinaciones de las demás.
4. Top-Hat: Esta distribución presenta en un plano la forma gaussiana mientras que en otro la distribución es rectangular. Es típica de los láseres de diodo.

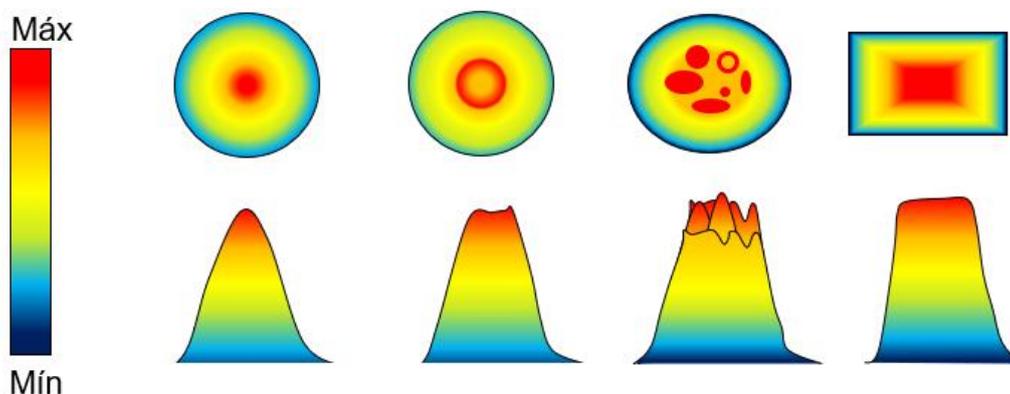


Figura II-12: Representación de la planta y alzado de las distintas distribuciones de energía del haz láser.

2.2.3 Beam Parameter Product (BPP)

Este parámetro se define como el diámetro del haz en el plano de focalización (convergencia) multiplicado por el semi-ángulo de divergencia (Figura II-13) y sirve para medir la calidad del haz láser ya que, a menor valor de este parámetro, más similar será el haz a una distribución gaussiana concentrando mayor cantidad de energía en un menor diámetro.

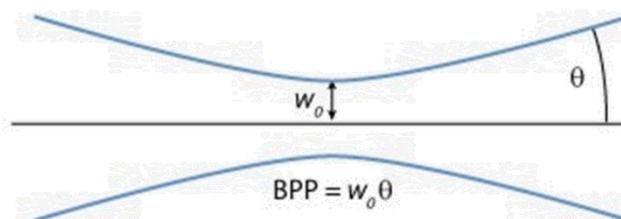


Figura II-13. Esquema del Beam Parameter Product (BPP).

En los procesos de fabricación aditiva este parámetro no es tan crítico como en soldadura, marcado o corte (Figura II-14) por lo que permite el uso de distribuciones de energía no gaussianas.

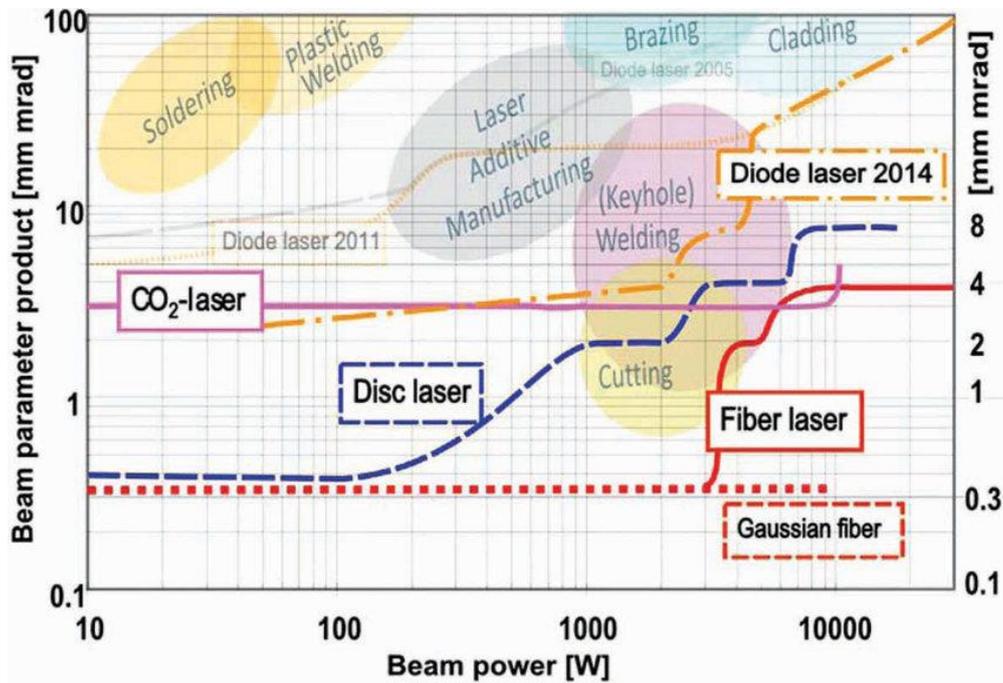


Figura II-14: Comparación de distintos sistemas láser [Rodrigues, 2014].

2.2.4 Tipo de cabezal láser

Independientemente de la densidad de energía, distribución de energía y del BPP, actualmente es posible encontrar varios modelos de cabezal láser para DED que difieren principalmente en la forma de inyección del polvo. El tipo de cabezal es crítico para la eficiencia en procesos donde se deba inclinar el cabezal láser o seguir trayectorias en múltiples direcciones.

- Cabezal con inyector lateral (Figura II-15.a): El láser es axial al cabezal mientras que el polvo metálico es suministrado por un inyector lateral. Este tipo de cabezal es utilizado para recubrir tanto externamente como internamente geometrías de revolución como ejes y husillos donde la estrategia de aporte es unidireccional [Ur Rahman, 2018].
- Cabezal con inyector coaxial discreto (Figura II-15.b): El láser es axial al cabezal mientras que el polvo metálico es suministrado por varios inyectores laterales dispuestos concéntricamente. Este modelo está recomendado cuando es necesario inclinar el cabezal láser ya que la gravedad no afecta tanto al flujo de polvo como en otros modelos comerciales. Es por ello por lo que es el modelo más usado aportando geometrías complejas en 5 ejes [Lei, 2017].

- Cabezal con inyector coaxial continuo (Figura II-15.c): El láser es axial al cabezal mientras que el polvo metálico es suministrado concéntricamente a través de una ranura en forma de anillo. Es el que mayor eficiencia ha demostrado pudiendo llegar al 90% [Zhong, 2017]. Sin embargo, no está recomendado para aplicaciones en las cuales se deba inclinar el cabezal ya que la gravedad desvía el flujo de polvo del punto focal del láser. Este hecho reduce la cantidad de polvo en la zona de aporte y, por tanto, reduce la eficiencia del proceso.
- Cabezal con inyección axial (Figura II-15.d): Este sistema invierte el sistema de un cabezal coaxial continuo. En este modelo, el polvo es inyectado axialmente mientras el láser es focalizado mediante un complejo sistema de lentes en un anillo concéntrico [Zhu, 2017]. Este cabezal permite aportar material en un mayor rango de ángulos de inclinación que las demás soluciones comerciales [Lamikiz, 2011].

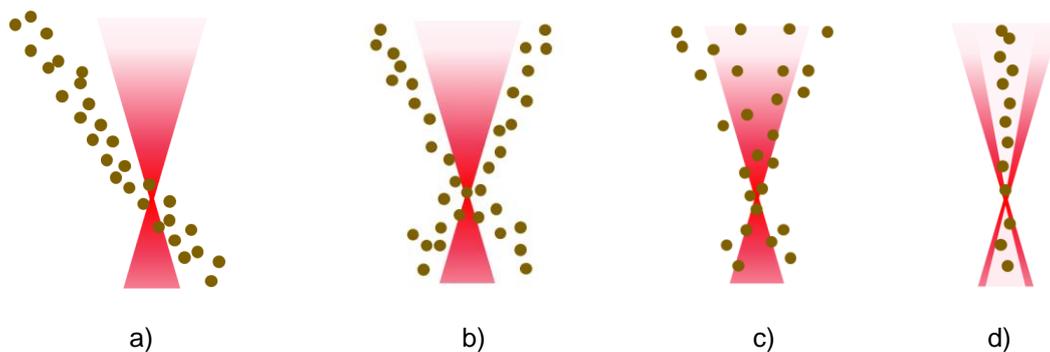


Figura II-15: a) Cabezal lateral; b) Cabezal coaxial discreto; c) Cabezal coaxial continuo; d) Cabezal axial.

Algunos ejemplos de empresas que suministran cabezales de aporte por láser son Precitec Group [PRECITEC, 2020], Trumpf [TRUMPF, 2020], Nittany Laser Technologies [NITTANY, 2019], Hybrid Manufacturing Technologies [H.M.T.-a, 2020], RayTools [RAYTOOLS, 2019] y Fraunhofer IWS [FRAUNHOFER IWS, 2020].

2.3 Alimentador de Polvo

Este elemento se encarga de suministrar el polvo metálico hasta los inyectores del cabezal. Para ello, se utiliza un gas inerte (generalmente Argón o Nitrógeno) para arrastrar el material. Actualmente se están desarrollando alimentadores de polvo exclusivos para procesos de fabricación aditiva [METCO Press, 2020] ya que la mayoría de los diseños existentes son para procesos de proyección térmica donde la cantidad de material aportado es mucho mayor. Esto puede generar discontinuidades en el flujo de material aportado cuando se trabaja con menor cantidad de material como es en el caso del aporte láser. Sin embargo, el

funcionamiento básico de estos alimentadores es el mismo independientemente de la tecnología. En función de la forma de regular el material aportado se pueden dividir los alimentadores en dos grupos: volumétricos y gravimétricos.

Los gravimétricos monitorizan los cambios de peso del polvo en la tolva y regulan automáticamente el flujo de polvo inyectado por las diferencias de peso durante el proceso de aporte. Sin embargo, no son recomendables cuando la cantidad de polvo aportado es pequeña ya que muchos carecen de la precisión suficiente para asegurar un flujo estable y los que pueden tenerla suponen un alto coste económico frente a las volumétricas.

Por otro lado, los volumétricos son más precisos y baratos que los gravimétricos cuando el flujo de polvo que se utiliza es pequeño, pero precisan de una calibración inicial para saber qué cantidad se está inyectando. Estos alimentadores de polvo se regulan indirectamente por la velocidad de algún elemento que regula la cantidad de material suministrado, pero carecen de monitorización del proceso por lo que no puede regular el proceso en tiempo real como los gravimétricos. Sin embargo, actualmente se disponen de soluciones comerciales como el de la empresa Medicoat que miden indirectamente el flujo y permiten monitorizar en tiempo real el proceso en un alimentador volumétrico [FlowWatch, 2019].

Ambos tipos de alimentadores pueden dividirse en 4 tipos en función del sistema de alimentación de polvo que utilicen:

- Alimentador de disco (Figura II-16.a): Consiste en un disco con una ranura que se llena de polvo y lleva el material hasta el punto en que se mezcla con el gas y es arrastrado al cabezal láser. La velocidad del disco regula la cantidad de polvo en el flujo de gas.
- Alimentador de husillo (Figura II-16.b): Consiste en un husillo/tornillo que lleva el material hasta el punto en que se mezcla con el gas y es arrastrado al cabezal láser. La velocidad del husillo regula la cantidad de polvo en el flujo de gas.
- Alimentador de lecho fluido (Figura II-16.c): Consiste en inyectar gas a alta presión de forma que el polvo se “fluidiza con el gas”. Esa mezcla de gas y polvo debe pasar por una boquilla convergente/divergente que regula el flujo que es arrastrado al cabezal.
- Alimentador vibratorio (Figura II-16.d): Consiste en un conducto vibratorio sobre el cual desliza el polvo. La magnitud de la vibración regula la cantidad de polvo en el flujo de gas.

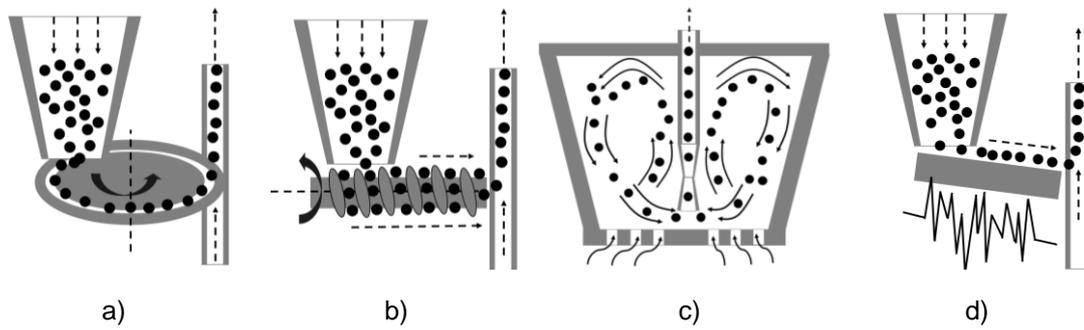


Figura II-16: Tipos de alimentadores de polvo. a) Alimentador de disco; b) Alimentador de husillo; c) Alimentador de lecho fluido; d) Alimentador vibratorio.

Independientemente del tipo de alimentador, todos suelen disponer de algún elemento que ayuda a que el polvo fluya adecuadamente desde la tolva de carga hasta la parte de alimentación del flujo de polvo. Este elemento suele ser un agitador metálico cuya función es simplemente evitar el apelmazamiento del polvo. También disponen de una tolva con un sistema calefactor de temperatura regulable para evitar que la humedad ambiental pueda afectar al material apelmazándolo o provocando algún fenómeno de corrosión u oxidación.

Algunos ejemplos de empresas que suministran alimentadores de polvo para aplicaciones de recubrimiento son Praxair [PRAXAIR, 2020], Trumpf [TRUMPF, 2020], Medicoat [MEDICOAT, 2019] y Oerlikon Metco [OERLIKON, 2020].

2.4 Configuración cinemática de los ejes de la máquina

La configuración cinemática es el parámetro de mayor impacto a la hora de seleccionar el tipo de cabezal láser. La mayoría de las máquinas de aporte láser se basa en una configuración cinemática de 5 ejes (Figura II-17), siendo la configuración RLLLR la más común [Cortina, 2018-a].

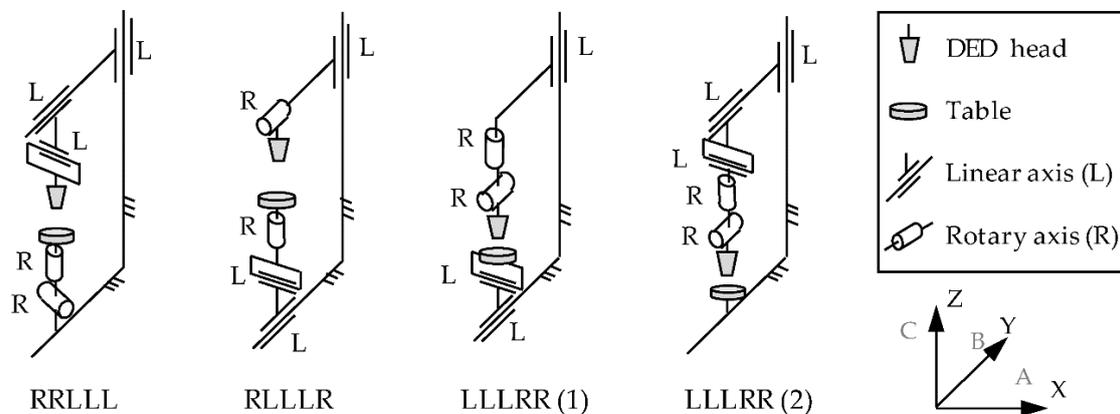


Figura II-17: Configuraciones cinemáticas típicas en máquinas híbridas de proceso aditivo + sustractivo [Cortina, 2018-a].

Tomando en cuenta el cabezal láser, la configuración RRLLL es la más común con el cabezal con inyector coaxial continuo y el cabezal con inyector lateral para recubrimientos internos [DBCH, 2019] debido a que el cabezal láser trabaja en 3 ejes sin inclinación. Con las configuraciones RLLLR, LLLRR (1) y LLLRR (2) es común el uso del cabezal con inyector coaxial discreto si se trabaja inclinándolo. Teniendo en cuenta el tamaño de la pieza, las configuraciones LLLRR (1 y 2) son típicas cuando la pieza es grande y difícil de mover.

A estas configuraciones se ha de sumar recientemente la cinemática de 5 ejes y rotación pura del robot serial [Zhu, 2017]. Cabe destacar la solución comercial que la empresa KUKA oferta actualmente y en donde se ha diseñado un cabezal láser compacto para poder ser acoplado a un robot serial (Figura II-18). La principal ventaja es la posibilidad de realizar el aporte in-situ sobre piezas de gran tamaño. La compañía Hardwear Pty Ltd [HARDWEAR L.S, 2020] es un claro ejemplo de esta aplicación mediante la reparación in-situ de rodets de turbinas de plantas eléctricas o de railes de metro. Sin embargo, los robots seriales carecen de la robustez de las máquinas herramientas y están diseñados para acceder a posiciones concretas de forma precisa pero no a velocidades constantes. Esto limita el peso del equipo que se puede utilizar y genera irregularidades en el aporte si no se obtiene un proceso a velocidad constante.



Figura II-18: Cabezal láser MWO-I Powder diseñado para robot serial. Fuente: [KUKA, 2020].

3 Modelización y simulación del proceso

El procedimiento experimental típico consiste en estudiar las características del cordón individual aportado verticalmente sobre una superficie horizontal. El estudio se realiza variando distintos parámetros del proceso para generar un mapa de parámetros óptimos según los resultados obtenidos [de Oliveira, 2005]. Este mapa sirve de pilar para sucesivos estudios del cordón solapado y paredes multicapa [El Cheikh, 2012-a], y en distintas disposiciones de aporte [Arregui, 2018]. Estos estudios se realizan experimentalmente [Möller, 2016] manteniendo

fijas ciertas condiciones para reducir el número de experimentos. Sin embargo, la aplicación de ese enfoque implica incertidumbres dado que se desconoce la importancia de algunas interacciones entre parámetros, lo que limita la efectividad de los resultados [Azarniya, 2019].

Para agilizar este proceso se han desarrollado modelos numéricos. Estos modelos son un conjunto de expresiones matemáticas resueltas en un entorno de cálculo computacional que describen la transferencia de materia y energía en el proceso y permiten predecir características complejas del material aportado como la estructura, tensiones residuales, distorsiones [Lu, 2019-b], geometría, propiedades mecánicas [Arrizubieta, 2018] (Figura II-19), probabilidad de aparición de defectos, tamaño de grano [Wei, 2019], etc. Dentro de este grupo se puede encontrar un número muy limitado de soluciones comerciales, las cuales se basan en integrar dentro de un entorno común un conjunto de modelos numéricos que resuelven el flujo de partículas (mediante un modelo CFD simplificado) y el modelo térmico resultante de la radiación del láser sobre el sustrato. Algunos de estos modelos resuelven el problema térmico y de distorsiones geométricas de forma acoplada para obtener el mapa de tensiones residuales resultante [FLOW-3D, 2020].

Sin embargo, este tipo de modelos presenta dos grandes desventajas. En primer lugar, y debido a la complejidad del proceso de aporte, es necesario introducir en todos los casos hipótesis simplificadoras que ayuden a abordar el cálculo planteado. Así, muchos modelos establecen condiciones de flujo de aporte de polvo constante, asumen tamaños de partículas de polvo constante, omiten el fenómeno de la fusión del material, etc. En segundo lugar, tal y como se ha mencionado anteriormente, se trata de cálculos muy complejos y que conllevan un elevado coste computacional, por lo que están limitados a casos simples y geometrías reducidas. El empleo de este tipo de modelos en componentes de gran tamaño, con múltiples capas y con altos volúmenes de material aportado es todavía inviable.

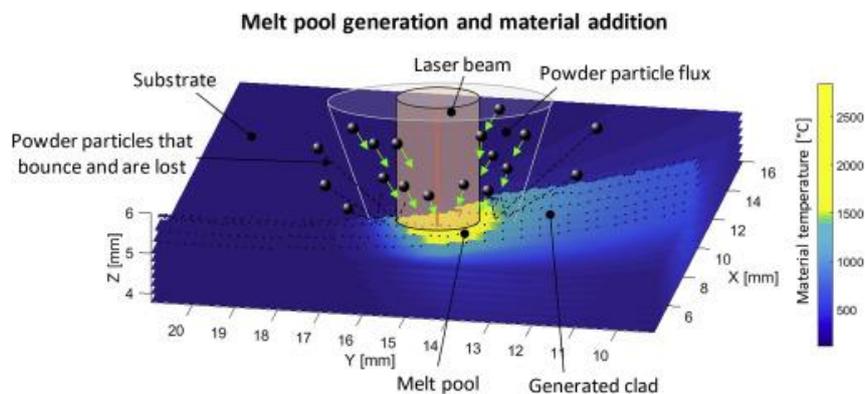


Figura II-19. Esquema del proceso de aporte según el modelo numérico [Arrizubieta, 2018].

Las simulaciones del proceso suelen incluir una simulación del flujo de polvo aportado mediante el cálculo por elementos discretos y simulación del proceso de aporte por elementos finitos [Tamanna, 2019]. Aunque ha habido grandes progresos, el tiempo de cálculo continúa siendo elevado pudiendo llevar hasta 6 horas el cálculo simplificado de tensiones residuales y distorsiones en geometrías simples [Salonitis, 2016].

Como alternativa a la complejidad de los modelos numéricos, se han desarrollado modelos geométricos empíricos buscando calcular de forma precisa aspectos básicos del proceso. Estos modelos se basan en relaciones estadísticamente significativas entre variables dentro de un rango de estudio. Aunque no dan tanta información como los numéricos, sí que dan datos de forma precisa y rápida simplificando el número de pruebas que hay que realizar. Además, pueden dar una predicción de la geometría que tiene que mecanizarse posteriormente. Algunos modelos propuestos de la geometría del cordón individual [Bax, 2018] suponen una forma circular de la sección transversal del cordón [El Cheikh, 2012-b] (Figura II-20.a). Sin embargo, pocas son las aplicaciones en que solo se vaya a utilizar un solo cordón. Otros modelos se centran en el cordón solapado (recubrimientos) de un material concreto metálico o cerámico de geometría muy particular [Chen, 2019], otros suponiendo una geometría circular de cada cordón aportado [Zhang, 2014] (Figura II-20.b) y otros modelos se ajustan mejor suponiendo una forma parabólica [Ocelík, 2014]. En cuanto al modelo geométrico solapado multicapa, aunque hay trabajos que lo abordan [Nenadl, 2016], no hay un modelo definido.

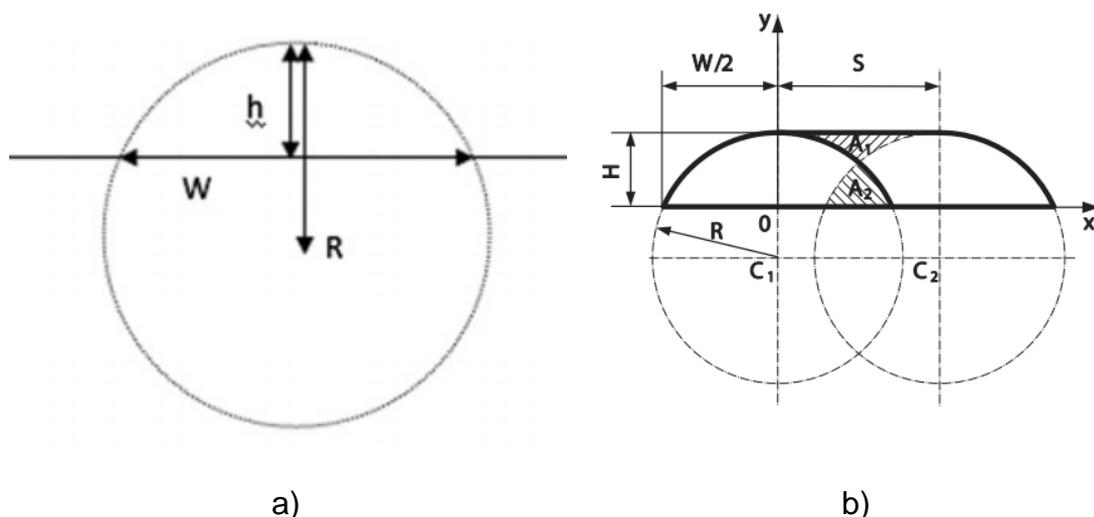


Figura II-20. a) Sección transversal del cordón simple como parte de una circunferencia perfecta [El Cheikh, 2012-b]; b) Sección transversal del cordón solapado suponiendo una geometría circular [Zhang, 2014].

Algo que tienen en común estos modelos del cordón solapado es que parten de la altura y anchura del cordón individual. Esto es debido a que, con el fin de simplificar el cálculo, el área del cordón simple se obtiene según estas dos características y el modelo del cordón simple en vez de con el área real. Estos modelos se aplican solo para el material aportado ya que no aportan ningún modelo para la dilución con el sustrato.

En el caso del modelo propuesto por Ocelik et al. (Figura II-21), cada nuevo cordón que forma parte del recubrimiento presenta una forma parabólica de segundo grado resultante del material aportado y el material solapado del cordón anterior. Este modelo permite obtener la altura, ondulación y perfil del recubrimiento.

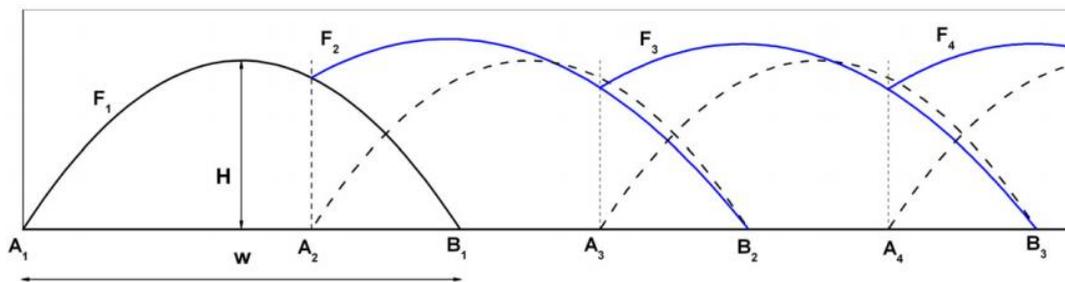


Figura II-21. Esquema del cálculo del perfil del recubrimiento según Ocelik et al. [Ocelik, 2014].

Así, y a la vista del estado del arte actual, no se han desarrollado modelos semi-empíricos que apliquen una serie de algoritmos simplificados sobre la base de información obtenida a través de ensayos experimentales. Este tipo de modelos, muy extendidos en otros procesos como el mecanizado o los procesos de deformación de chapa, pueden ser aplicados en casos complejos, pero con un coste computacional muy inferior a los numéricos.

4 Monitorización y control

Para obtener un proceso industrial de aporte fiable y eficiente, es necesario la inclusión de sistemas de control de lazo cerrado dentro del proceso que actúen sobre los parámetros principales (potencia, avance y flujo de polvo), adaptándose automáticamente según los datos registrados durante el proceso. La inclusión de estos sistemas implica integrar más sistemas al proceso que interactúan con el resto de la máquina y con las trayectorias de aporte. Los parámetros más frecuentes de monitorización en el estado del arte son la geometría del baño fundido, defectos en la estructura (porosidades y grietas), altura de material depositado o simplemente temperatura [Dass, 2019]. Sin embargo, la mayoría de los esfuerzos se han centrado en monitorizar la

temperatura, tamaño del baño fundido y altura de la capa depositada además del control dimensional posterior de la geometría aportada.

A continuación, se realiza una descripción de los trabajos centrados en monitorizar y controlar los principales parámetros del proceso que son el baño fundido, la altura de capa, el flujo de polvo y la geometría final aportada.

4.1 Monitorización del baño fundido

Se trata de uno de los métodos más extendidos y eficaces para monitorizar el proceso de aporte por láser. Dado que la temperatura es un parámetro relevante que afecta a la estructura metalúrgica [Farshidianfar, 2017] y a la precisión dimensional del material aportado, se busca la medida indirecta de un parámetro que esté relacionado con la temperatura del proceso. Dado que el proceso de aporte por láser se basa en la fusión del sustrato mediante un láser, a medida que se ejecuta el proceso, se va calentando el sustrato, por lo que si se continúa aportando en la misma zona el proceso alcanzara mayores temperaturas. Esto aumentará el baño fundido y la dilución provocando diferencias dimensionales, variaciones en la estructura del material y finalmente se influirá en las características mecánicas en las distintas capas de material aportado. También aumentara la fluidez del material aportado pudiendo provocar perdida de forma, y si la temperatura alcanzada es muy elevada, provocará la evaporación de material y un aumento de la zona afectada térmicamente. De esta manera, si se controla el tamaño de la zona fundida por el láser, se dispone de un control indirecto sobre la temperatura del proceso y se puede reducir el impacto de las variaciones en la microestructura y en las propiedades mecánicas.

El control del tamaño del baño fundido se basa en variar la potencia mediante un control en lazo cerrado durante el proceso. Para ello, lo más complejo es realizar la medida del baño fundido, para lo que se emplean cámaras CMOS. Posteriormente, el control del baño fundido se realiza mediante un algoritmo de control de lazo cerrado que permite mantener constante el tamaño del baño fundido independientemente de la geometría de la pieza en cada momento [Hofman, 2012].

Otra alternativa es el control de la temperatura directamente. Para ello, la temperatura se controla mediante pirómetros o cámaras termográficas (Figura II-22). Sin embargo, las mediciones en este proceso se caracterizan por el ruido que provoca el polvo inyectado [Mozaffari, 2013] por lo que es complicado obtener una lectura limpia de la temperatura y geometría del baño fundido.

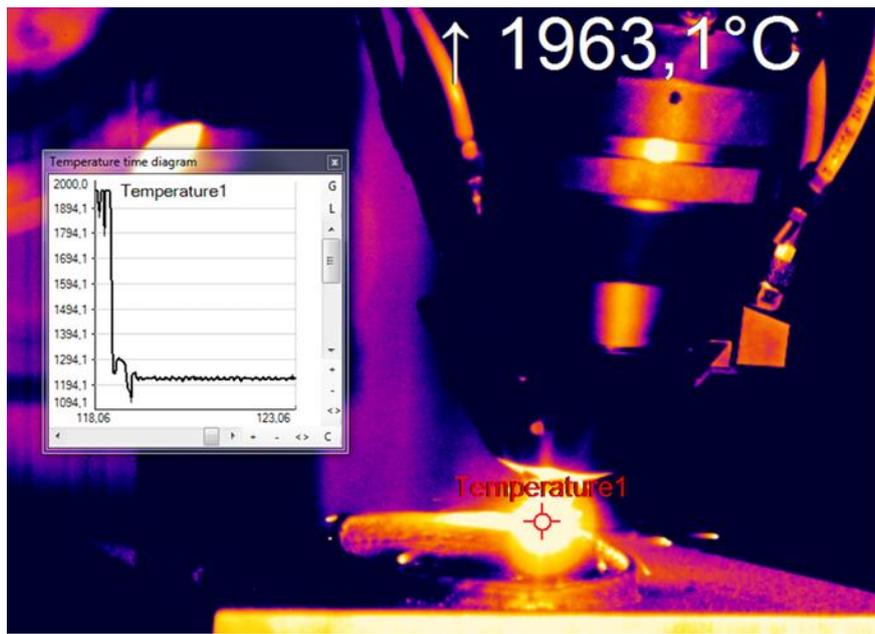


Figura II-22. Imagen y medición de temperatura con una cámara térmica.

Aun así, se ha podido relacionar alteraciones en la amplitud media del ruido con inestabilidades del proceso como daños en la lente protectora del cabezal láser o problemas de oxidación y dilución [Bi, 2006]. La alineación de la cámara coaxialmente está fuertemente recomendada ya que la disposición lateral, aunque es más sencilla, puede provocar errores de medición.

Este tipo de control mejora el perfil del material depositado al reducir su ondulación y, por tanto, estabiliza las fuerzas de corte a las que está sometida la herramienta en el mecanizado posterior. También permite monitorizar defectos como falta de fusión o porosidades [Yang Chua, 2017]. Sin embargo, no está claro el efecto del control de potencia en la eficiencia del proceso y si la altura de la capa depositada permanece constante utilizando este tipo de control.

El control de la potencia es crítico en aplicaciones de recubrimiento de sustratos de pequeño espesor como por ejemplo tuberías para el sector petroquímico. En este tipo de casos el aumento de temperatura con el tiempo de proceso es excesivo y lleva a daños graves en el sustrato. Un ejemplo de este control es el sistema *CLAMIR* para el control de recubrimientos fabricados mediante DED de la empresa New Infrared Technologies [N.I.T., 2018]. Otro ejemplo que destacar es el introducido por DMG Mori en sus máquinas híbridas y de láser DED. Este sistema, denominado AM Assistant (Figura II-23), fue presentado en la EMO 2019 y se basa en la monitorización de diferentes parámetros (incluyendo el tamaño del baño fundido).

LAUNCH AT THE EMO – AM ASSISTANT

DMG MORI

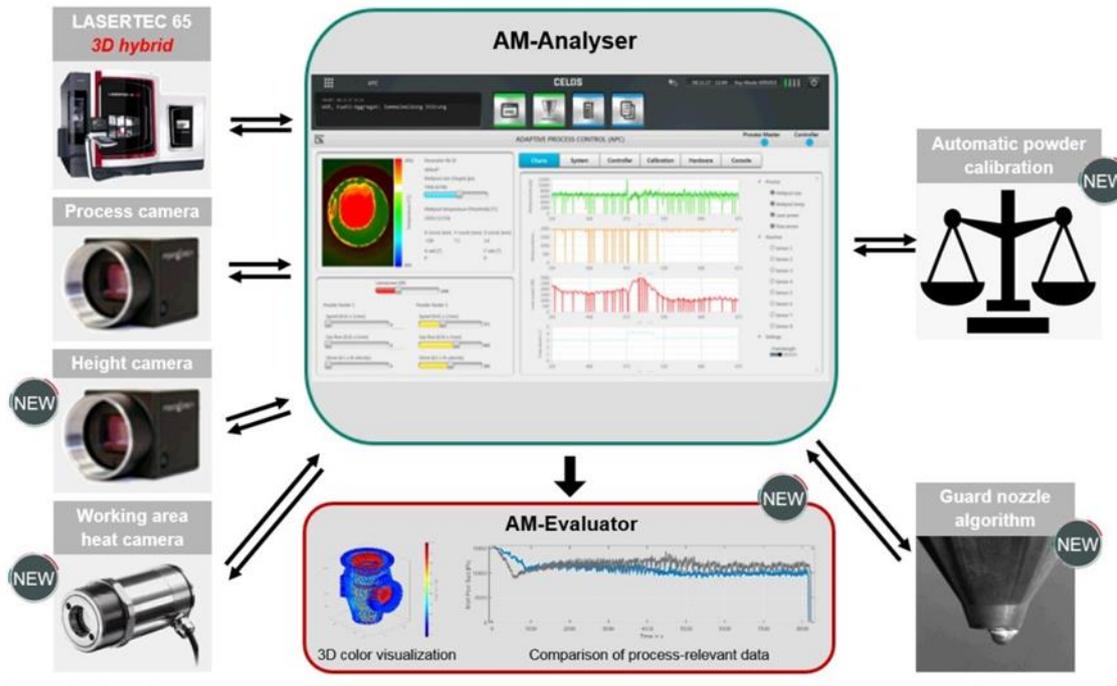


Figura II-23. Sistema AM Assistant de DMG Mori para sus máquinas híbridas y de láser DED.

4.2 Altura de capa

El control de la altura de la capa aportada también es crítico. Si la capa aportada crece menos de lo calculado, tras varias capas la distancia de aporte entre el cabezal láser y el sustrato será mayor provocando un proceso de aporte deficiente y generando una estructura defectuosa dimensionalmente [Pinkerton, 2004].

Este control de capa se puede realizar durante el proceso de aporte triangulando un haz láser coaxial de distinta longitud de onda que el láser de aporte [Donadello, 2019] y variando la velocidad de aporte [Breuer, 2019] de forma que la capa crezca lo establecido. El control de altura también se puede realizar parando el proceso entre capas, obtener la geometría aportada real mediante luz estructurada y adaptar las trayectorias a las diferencias con la geometría programada [Garmendia, 2019].

Es importante puntualizar que tanto el control de altura por láser como el control del baño fundido y temperatura se realizan coaxialmente. Este hecho unido a que influyen en diferentes parámetros del proceso puede producir problemas de espacio para integrar todos los sensores necesarios e incompatibilidades en las estrategias de control si no se desarrollan como un control de forma conjunta.

El control de altura desarrollado por Siemens empleando un sensor Precitec basado en interferometría [Siemens H.C., 2020] para el proceso de aporte láser es un claro ejemplo de este tipo de controles [Regulin, 2020].

4.3 Flujo de polvo

Uno de los problemas de monitorizar el flujo en los procesos de aporte por láser es el bajo flujo de polvo empleado (entre 5 y 20 g·min⁻¹) comparado con otros procesos como la proyección térmica. Los sistemas de monitorización basados en el peso de los alimentadores gravimétricos no suelen ser efectivos para generar un flujo uniforme en estos casos y esto puede derivar en un proceso de aporte con variaciones notables en la cantidad de material aportado [Thayalan, 2006]. Es por esto por lo que, para monitorizar el flujo de polvo en el proceso de aporte por láser, se suelen utilizar sensores ópticos en el recorrido del flujo debido al impacto directo que tiene el polvo del flujo en la intensidad de la luz que se puede detectar [FlowWatch, 2019]. Una fotorresistencia transforma esa intensidad de luz en un voltaje que permite monitorizar el flujo y actuar directamente sobre el alimentador de polvo en función de la señal generando un control de lazo cerrado.

Como el flujo es llevado varios metros hasta los inyectores del cabezal, es complicado un sistema de control con tiempos de respuesta cortos por lo que estos sistemas de control se emplean para asegurar un flujo estable durante el proceso. Características del polvo como el tamaño, densidad o superficie tienen un efecto directo no solo en el flujo que proporciona el alimentador sino también en la respuesta del sensor. Por otro lado, la tecnología de medición de intensidad de luz es muy robusta, pero da una información cualitativa, por lo que no se conoce el flujo másico exacto sino la proporción de polvo presente en el sensor en cada momento.

4.4 Verificación de la geometría obtenida

La baja precisión dimensional del proceso unida a la incertidumbre de la geometría final obtenida hace necesaria una inspección antes de la fase de mecanizado. En aplicaciones de reparación y recubrimiento también hay una incertidumbre de la geometría inicial del sustrato por lo que también hay que inspeccionar el sustrato antes del proceso aditivo.

Esta etapa de inspección es más crítica en fabricación híbrida (aditivo + mecanizado) ya que su principal ventaja es incorporar ambos procesos sin necesidad de mover la pieza. Esto elimina errores asociados a la manipulación

de la geometría y decalaje. Sin embargo, para que esta solución sea plena hace falta también incorporar un sistema de medición in-situ.

Aunque se han estudiado diversos métodos en otras tecnologías aditivas [Cortina, 2018-a], no se han estudiado muchas alternativas para procesos de laser cladding. Siemens ha incorporado dentro de su software NX la inspección de piezas de aditivo utilizando un palpador para validar la calidad [Inspection 3D, 2020] y otros trabajos se han centrado en el escaneado 3D por láser [Liu, 2015] o por sistemas de medición de luz estructurada [Alberdi, 2019] integrados a la propia máquina (Figura II-24).

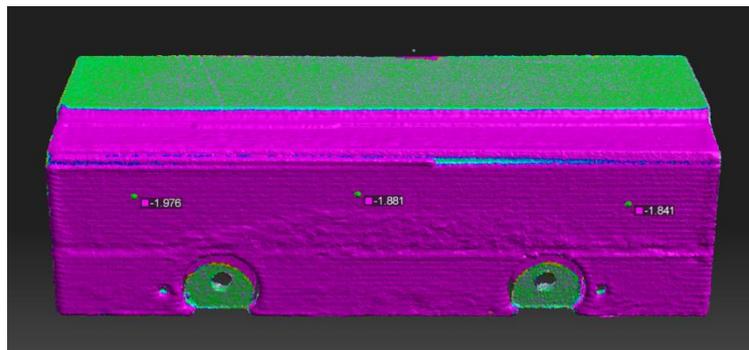


Figura II-24. Medición de un recubrimiento aportado por láser mediante luz estructurada.

5 Hibridación: Fabricación aditiva + Sustractivo

La hibridación es una tendencia que se ha aplicado durante décadas, con el objeto de integrar todas las operaciones del proceso de fabricación en una sola máquina. De esta forma, se consigue reducir el número de equipos necesarios para la fabricación de una serie de componentes, así como el espacio y el transporte de material en planta. Dada la necesidad de mecanizar todas las piezas sobre las que se ha aportado material, a lo largo de los últimos 15 años se han desarrollado una serie de sistemas multiprocesos en las que se ha integrado la fabricación aditiva con las operaciones de mecanizado. La fabricación aditiva conlleva un cambio de paradigma desde el diseño de la pieza [Greer, 2019], pasando por la combinación aditiva-sustractiva [Ewald, 2018] y los tratamientos térmicos necesarios tanto previamente como posteriormente [Roy, 2018]. La hibridación supone una gran ventaja al poder hacer los dos procesos en una sola máquina sin necesidad de mover la pieza y poder combinarlos a demanda [Yamazaki, 2016], [Jones, 2012], [Karunakaran, 2008]. Sin embargo, la hibridación conlleva también varios retos, aparte de los ya comentados, que actualmente también se están abordando [Cortina, 2018-a]:

- La limpieza o mecanizado de las proyecciones de polvo en las zonas cercanas a la deposición de material [Arregui, 2018].

- La incertidumbre de la geometría obtenida por DED [Möller, 2016].
- Las estrategias [Hao, 2019] y trayectorias propias de la fabricación aditiva [Flores, 2019].
- La maquinabilidad del material aportado [Calleja, 2018].
- Gestión de los residuos generados por el polvo metálico.

Por tanto, la hibridación no solo es añadir un paso más en la cadena de producción, es un nuevo replanteamiento del proceso establecido. Esto se traduce en una necesidad de operarios con un fuerte conocimiento tanto del proceso mecanizado como del proceso aditivo para que pueden combinar de forma óptima ambos procesos en cada caso de uso [Dass, 2019].

Actualmente hay varias empresas que ofertan una solución comercial híbrida del proceso de mecanizado en 5 ejes y del proceso de aporte por DED utilizando polvo, combinando ambos procesos en una sola máquina. Esto es debido a la posibilidad de acoplar en el cabezal láser un portaherramientas común, a que el polvo es suministrado por tubos de plástico desde el alimentador mediante un gas de arrastre y a que el haz láser puede ser transmitido por fibra óptica desde el generador. La mayoría de las máquinas híbridas disponen de un cambiador de herramientas específico para el cabezal láser sin embargo hay una solución comercial destacable, la de la empresa Hybrid Manufacturing Technologies [H.M.T.-b, 2020] que ha diseñado un cabezal láser que puede ser almacenado como una herramienta más de la máquina (Figura II-25). Esto permite tener en el almacén distintos cabezales láser que permitan aportar distintos tamaños de cordón o que sean específicos de otros procesos láser como temple, pulido, soldadura, etc.



Figura II-25. Cabezal láser intercambiable AMBIT™. Fuente: Hybrid Manufacturing Technologies [H.M.T.-b, 2020].

Algunos ejemplos de empresas con soluciones híbridas en el mercado son:

- El modelo ZVH Add+Process de fabricante IBARMIA [ZVH, 2019]: multiproceso 5 ejes (fresado y torneado, Figura II-26).
- El modelo LASERTEC 65 3D del fabricante DMG Mori [LASERTEC, 2019]: fresadora 5 ejes (Figura II-27).
- El modelo INTEGRIX i-400AM del fabricante MAZAK [INTEGRIX, 2019]: multiproceso 5 ejes (Figura II-28).
- Series MU-V y MULTUS U LASER EX de OKUMA [Series MU-V, 2019]: multiproceso de 5 ejes.
- El modelo Millturn M80 del fabricante WFL [Millturn, 2019]: Multiproceso (fresado y torneado).
- REICHENBACHER HAMUEL [HYBRID HSTM-a, 2018]: torno-fresadora de 5 ejes.

En cuanto a las soluciones de control para fabricación híbrida:

- Siemens 840D [Siemens 840D, 2019]: Desarrollado por Siemens para las máquinas híbridas LASERTEC 65 3D y ZVH 45/1600 Add+Process.
- Fanuc 31i: Desarrollado por Fanuc para la máquina [HYBRID HSTM-b, 2018] dispone de control Fanuc 31i.
- LN4RP NC [LN4RP NC, 2019]: Desarrollado por Sodick para la máquina Sodick OPM250E machine (SLM + mecanizado).

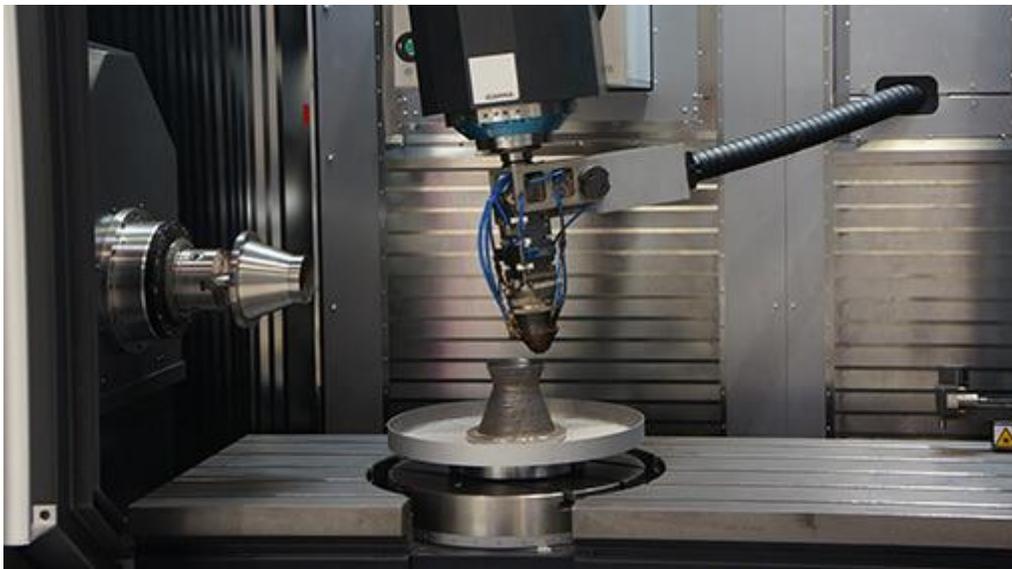


Figura II-26. Máquina híbrida ZVH Add+Process de la empresa Ibarmia: Aporte láser DED y mecanizado multiproceso en 5 ejes.



Figura II-27. Máquina híbrida LASERTEC 65 3D de la empresa DMG Mori: Aporte láser DED y fresado en 5 ejes.



Figura II-28. Máquina híbrida INTEGREX i-400AM de la empresa Mazak: Aporte láser DED y mecanizado multiproceso en 5 ejes.

Actualmente también se disponen de soluciones CAM comerciales para el proceso híbrido. Algunos ejemplos son:

- PowerMill [PowerMill, 2019]: De la empresa Delcam.
- NX Hybrid Additive Manufacturing: De la empresa Siemens y específico para máquinas híbridas LaserTec DMG MORI [NX Hybrid, 2019].
- OS-Flash [OS-FLASH, 2019]: En este caso SODICK desarrolló esta solución para fabricación híbrida en tecnologías de cama de polvo (fresado de alta velocidad + PBF).

- Hybrid Manufacturing Simulation: Desarrollado por [MachineWorks, 2019].

5.1 Residuos.

La mezcla de polvos metálicos finos proveniente de la fabricación aditiva, la viruta de mecanizado (torneado y fresado) y la taladrina conlleva varios problemas que hay que abordar, y que en la actualidad no están resueltos. La taladrina asegura la lubricación y refrigeración de la herramienta mejorando la calidad de la pieza, evitando mayor desgaste en la herramienta y sobrecalentamientos. Los sistemas actuales de los centros de mecanizado filtran las taladrinas de la viruta tras su uso, permitiendo así que vuelvan a ser utilizadas en el proceso de mecanizado. Mientras tanto, el gran volumen de virutas procedentes del mecanizado es extraído por elementos mecánicos a contenedores donde se depositan.

La inclusión de polvos metálicos en el proceso genera varios problemas:

- Los sistemas de filtraje convencionales no separan estas partículas de la taladrina, por lo que, al ser reutilizada, la taladrina presenta las partículas de polvo no filtrado entrando en contacto con la pieza y la herramienta, dañando la superficie de ambas y provocando un proceso de mecanizado deficiente. Además, estas partículas entran en contacto con todos los elementos del sistema de bombeo y distribución de la taladrina pudiendo dañarlos.
- El polvo presente en las virutas puede entrar en contacto con elementos móviles del sistema mecánico de extracción de virutas, acumulándose y generando daños a medio-largo plazo.
- El polvo presente en la máquina puede resultar inflamable en contacto con el aire u otros materiales, e.g. aluminio en polvo [INNST-AI, 2019].
- El contacto de la taladrina con las partículas de polvo metálico genera lodos finos que deben ser tratados aparte mediante un filtrado especial a banda de papel o precapa más típico en rectificadoras. Tras un primer filtrado de las virutas del mecanizado es necesario una etapa más que filtre las partículas provenientes del proceso DED.

Por tanto, es necesario desarrollar un sistema para extraer el polvo residual de las operaciones de aporte antes de mecanizar y filtrar los fluidos de corte empleados durante el mecanizado, separando virutas, polvo y taladrina. También es necesario:

- Un sistema de limpieza de la taladrina y aceite acumulado en el sustrato donde se realiza el aporte [Yan, 2018] para evitar los efectos negativos de estos [Cortina, 2018-b]. También hay soluciones comerciales de limpieza de virutas y taladrina para máquinas de mecanizado que pueden ser útiles como la solución de la empresa MIDACO [MIDACO Chip fan, 2019].
- Un sistema de recogida ignífugo del polvo tras el proceso de aporte [Scott, 2018] seguido de un proceso de limpieza del polvo que permita su reciclaje y posterior uso [Renderos, 2017].
- Un protocolo de limpieza del polvo que no ha podido ser recogido y que queda en la máquina para evitar que influya negativamente en el proceso de mecanizado o degrade elementos de la máquina. Para esto se puede usar la propia taladrina de la máquina a alta presión en una rutina de limpieza.
- Reducir la cantidad de polvo desechado. Son comunes las esperas de varios segundos entre pasadas para dejar que se enfríe el material aportado antes de aportar otro cordón. Esto mejora la geometría y características del material aportado. Sin embargo, durante ese tiempo se continúa inyectando polvo en vez de pararlo. Esto es debido a que al iniciarse la inyección de polvo se generan irregularidades en el flujo de material aportado hasta un momento en que el flujo se vuelve a estabilizar. Esto provoca mayor cantidad de polvo desechado y mayores tiempos de espera que optando por continuar inyectando polvo de forma continua. Una solución propuesta en el estado del arte es desviar el flujo mediante una electroválvula durante ese tiempo de espera [Arrizubieta, 2017-a]. Otra es refrigerar la base del sustrato [Chen, 2016] para reducir el tiempo de espera.
- Trabajar en el rango de máxima eficiencia del proceso de aporte. Esto se obtiene tanto optimizando los parámetros del proceso como utilizando el equipo más adecuado a la aplicación de uso.

5.2 Seguridad.

El hecho de introducir elementos como el haz láser y polvo metálico en una máquina herramienta, hace que los fabricantes deban tener en cuenta nuevos aspectos en relación con la seguridad y salud del operario. Los aspectos de seguridad relacionados con el polvo ya se han mencionado anteriormente por lo que solo queda explicar los aspectos de seguridad relacionados con el láser.

El láser utilizado en este proceso es el de mayor riesgo y está catalogado como clase 4 [UNE EN 60825-1 /A2: 2002.]. Estos láseres pueden producir reflexiones difusas peligrosas. Pueden causar daños sobre la piel y pueden también

constituir un peligro de incendio. Su utilización precisa una precaución extrema. Los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir se muestran en la Figura II-29.

Requisitos	Clasificación						
	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Cubierta protectora	--	O	O	O	O	O	O
Bloqueo de seguridad	X	X	X	X	+	+	+
Control remoto	--	--	--	--	--	O	O
Control de llave	--	--	--	--	--	O	O
Aviso de emisión	--	--	--	--	O	O	O
Atenuador del haz	--	--	--	--	--	O	O
Localización de controles	--	--	--	--	♣	♣	♣
Óptica de observación	--	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Barrido	O	O	O	O	O	O	O
Etiqueta de Clase	T	T	F, T	F, T	F, T	F, T	F, T
Etiqueta de abertura	--	--	--	--	Te	Te	Te
Etiqueta de entrada en servicio	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Etiqueta de neutralización del bloqueo	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Etiqueta de intervalo de λ	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Etiqueta de LED	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Manual con instrucciones de seguridad	O	O	O	O	O	O	O
Información de compra y servicio técnico	O	O	O	O	O	O	O
Productos médicos	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣

- O Obligatorio
- No necesario
- X Necesario para impedir emisión > 3R
- ♣ Necesario para impedir emisión > LEA Clase 1 ó 2
- Te Texto especificado requerido
- ▲ Correcciones de texto necesarias para productos LED
- ♣ Se aplica la norma CEI 60601-2-22
- + Necesario para impedir emisión > 3B
- T Texto requerido
- ▼ La emisión debe ser < LEA de la Clase 1
- F Figuras normalizadas
- (*) Obligatoria y específica para cada Clase
- ▼ Obligatoria para ciertos intervalos de λ
- ⊗ Obligatoria en ocasiones según la Clase

Figura II-29. Requisitos mínimos de seguridad de los equipos láser según la norma UNE EN 60825-1 /A2: 2002.

Esta información está disponible en la página del Instituto nacional de seguridad y salud en el trabajo [INNST, 2019].

6 Fabricación de componentes de Inconel 718 mediante aporte láser DED en máquinas híbridas (DED + mecanizado)

6.1 Inconel®718

Inconel es una marca registrada por la empresa Special Metals Corporation que es usada como prefijo para identificar a más de veinte aleaciones de metales resistentes a las altas temperaturas y corrosión. De todas estas aleaciones, el Inconel 718 es una superaleación de níquel-cromo-molibdeno diseñada para

resistir un amplio rango de ambientes corrosivos con excelentes propiedades mecánicas. Las propiedades más destacables del Inconel 718 son:

- Excelentes propiedades mecánicas.
- Buenas propiedades de resistencia a la fluencia, resistencia de deslizamiento y a la ruptura a altas temperaturas (Figura II-30).
- Alta resistencia al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos causado por cloruros y sulfuros.
- Buena resistencia a la corrosión acuosa y al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo causado por el ion cloro.
- Excelente resistencia a las altas temperaturas.
- Excelentes características para la soldabilidad, y resistente al agrietamiento después de ser soldado. Impurezas de azufre y carbono aumentan la susceptibilidad de agrietamiento del Inconel 718 [Muralidharan, 1996].

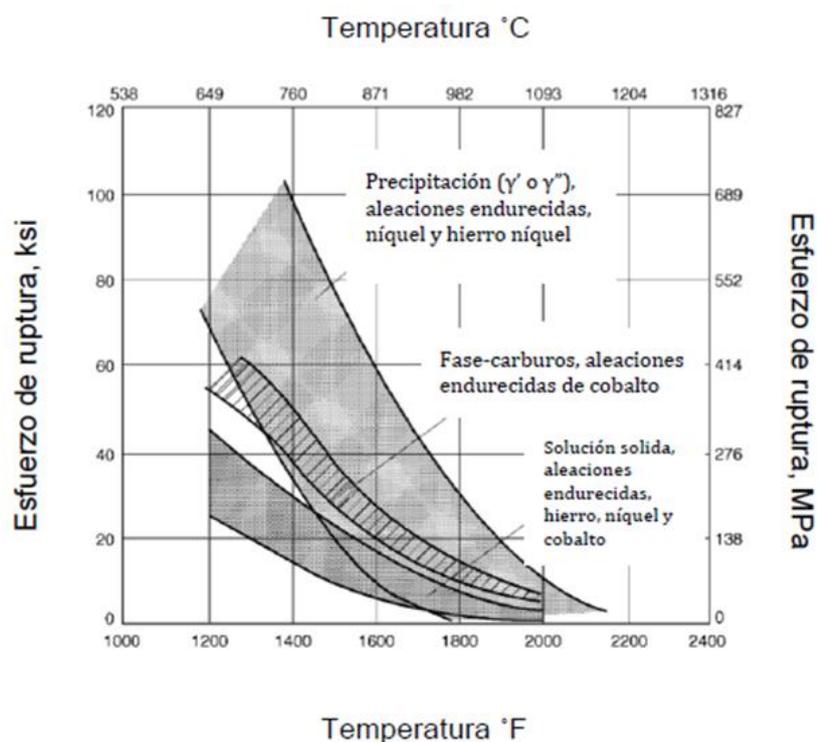


Figura II-30. Esfuerzo de ruptura a altas temperaturas de las superaleaciones [Donachie, 2002].

También es usada en aplicaciones criogénicas ($-220\text{ }^{\circ}\text{C}$). Para temperaturas mayores a $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, las superaleaciones base níquel comienzan a presentar ciertas limitaciones mecánicas, empleándose entonces superaleaciones de Cobalto.

Debido a sus excelentes propiedades mecánicas a altas temperaturas y su resistencia a la corrosión, son numerosas las aplicaciones de este material en

sectores como el petroquímico y aeroespacial. Sin embargo, este material también está presente en otros sectores debido principalmente a su versatilidad. Así pues, el Inconel 718 se emplea en otros sectores como el matricero por su alta resistencia a altas temperaturas y, sin embargo, también es empleado en el sector criogénico debido a su buena tenacidad a temperaturas bajo cero. Así pues, este material es empleado en la fabricación de:

- Componentes del motor de turbinas de gas.
- Componentes de turborreactores: carcasas, discos y álabes.
- Componentes de combustible líquido en motores de cohetes.
- Matrices y portamatrices.
- Equipos de control de polución.
- Reactores nucleares.
- Tanques de almacenamiento criogénico.
- Válvulas, tornillería, resortes, mandriles y ganchos para tubos.
- Válvulas en el extremo superior de pozos de perforación para el cierre de emergencia (BOP's).

La metalurgia física de las superaleaciones quizá sea la más compleja de las aleaciones en general debido a la cantidad de elementos aleantes presentes en estas. Cada uno de estos elementos aleantes (Tabla II-3) juega un papel importante y se debe controlar la cantidad añadida para no alterar las propiedades y características necesarias para la aplicación de cada una de ellas.

Tabla II-3. Composición química Inconel 718 (wt.%),.

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Mn
50-55	17-21	475-5.50	2,8-3,3	0,65-1,15	100 máx	0,2-0,8	0,35 máx
Si	Cu	C	P	S	B	Fe	
0,35 máx	0,30 máx	0,08 máx	0,015 máx	0,015 máx	0,006 máx	Resto	

Una de las características más sobresalientes de la composición del Inconel 718 es la adición de Niobio que le permite endurecer por precipitación de la fase Ni₃Nb mediante un tratamiento denominado envejecimiento térmico. Este tratamiento térmico le permite mejorar notablemente sus propiedades mecánicas. Los materiales utilizados en esta tesis son equivalentes al Inconel 718 tanto químicamente como en comportamiento, aunque no pertenezcan a esta compañía

6.2 Estructura y tratamientos térmicos del Inconel 718

En la mayoría de las superaleaciones base níquel, las principales fases (región de material que es químicamente uniforme y físicamente distinta) y estructuras presentes son las siguientes:

- Gamma (γ): Es la matriz de la aleación, y tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) a base de níquel. Por lo general contiene un alto porcentaje de elementos por solución sólida como Co, Cr, Mo, Fe y W.
- Gamma Prima (γ'): La fase gamma prima en las superaleaciones base níquel es $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ y es una fase de precipitación. La γ' precipita de manera homogénea en toda la matriz Gamma (γ) y da estabilidad. La γ' es una fase muy dúctil y por lo tanto da fuerza a la matriz sin reducir la resistencia a la fractura del material. Esta fase es el principal endurecedor del material en algunas superaleaciones, pero no en el Inconel 718. El Aluminio y el Titanio son los principales componentes y se añaden para precipitar una fracción de alto volumen en la matriz.
- Gama segunda (γ''): Esta fase tiene una estructura cristalina ordenada tetragonal centrada en el cuerpo con composición Ni_3Nb , se encuentra en las superaleaciones base hierro–níquel que contienen niobio; esta fase presenta una morfología en forma de disco y también precipita con una relación de coherencia bien definida con la matriz austenítica y el endurecimiento es debido a deformaciones coherentes que hay entre la γ/γ'' . Es una fase muy pequeña (600 Å, aproximadamente) que puede ser observada con técnicas como microscopía electrónica de transmisión. Esta fase es el principal endurecedor del Inconel 718.
- Carburos: El Carbono añadido en proporciones del 0,05-0,2% se combina con elementos reactivos y refractarios como el Titanio, el Tantalio y el Hafnio, para formar carburos como el M_2C_6 y M_6C que tienden a formarse en el límite de grano durante el tratamiento térmico. Estos carburos tienen una estructura cristalina FCC y son beneficiosos para aumentar la fuerza de ruptura a alta temperatura.
- Fase eta (η): esta fase presenta una estructura cristalina hexagonal D024 y una composición Ni_3Ti ; se caracteriza porque no tiene solubilidad por otros elementos, precipita lentamente, crece rápidamente y forma partículas más grandes que la misma γ' ; se puede encontrar como constituyentes con forma celular o como agujas.

- Fase delta (δ): las aleaciones que son endurecidas por la fase γ'' son susceptibles a formar la fase delta; esta fase es la forma termodinámicamente estable de la fase γ'' , con estructura cristalina ortorrómbica. Esta fase no contribuye a la resistencia del material, al contrario, su presencia se asocia con la susceptibilidad al agrietamiento en caliente. Fracciones moderadas de esta fase son efectivas en limitar el crecimiento de grano durante el tratamiento de solubilizado y en fronteras de grano donde se encuentre precipitada esta fase delta, si tiene una morfología adecuada, puede proporcionar resistencia a la fractura por fluencia en fronteras de grano. Esta fase puede aparecer también en aplicaciones sometidas a altas temperaturas y cargas cíclicas [Jambor, 2017].
- Boruros: el boro es agregado en pequeñas cantidades a las superaleaciones para evitar la formación de la fase eta y para mejorar las propiedades de ruptura por esfuerzo o termofluencia; los boruros son duros, frágiles y precipitan en las fronteras de grano; grandes cantidades de boro son dañinas para este tipo de aleaciones.
- Fases Laves: son partículas intergranulares gruesas observadas comúnmente en las aleaciones base hierro–níquel, aunque puede ocurrir precipitación intragranular. El silicio y el niobio promueven la precipitación de este tipo de partículas. Este tipo de fases tienen una estructura cristalina hexagonal $MgZn_2$ con una composición del tipo AB_2 , donde A puede ser Mo, Ti o Nb y B puede ser Fe, Cr, Mn o Si. Su fórmula general es $(Fe,Cr,Mn,Si)_2(Mo,Ti,Nb)$. Es común observarlas en las superaleaciones del tipo base hierro–níquel.
- Sigma (σ): es una fase que aparece tras permanecer la aleación mucho tiempo a alta temperatura y es un intermetálico de níquel con cromo y Molibdeno [Antonov, 2017].

Algunas de estas fases son indeseables como la fase η , δ , Laves y σ . Las superaleaciones base níquel, en particular las que poseen una elevada proporción de fase gamma prima (γ'), aumentan su resistencia a temperaturas elevadas, consiguiendo sus máximas prestaciones de resistencia hacia los 850 °C. Así pues, la mayoría de las modernas superaleaciones base níquel mantienen su resistencia mecánica útil hasta temperaturas del orden de los 1000 °C. En el caso del Inconel 718, la máxima responsable de su dureza es la fase γ'' que aparece tras tratar el material térmicamente por el tratamiento denominado endurecimiento por envejecimiento (Figura II-31).

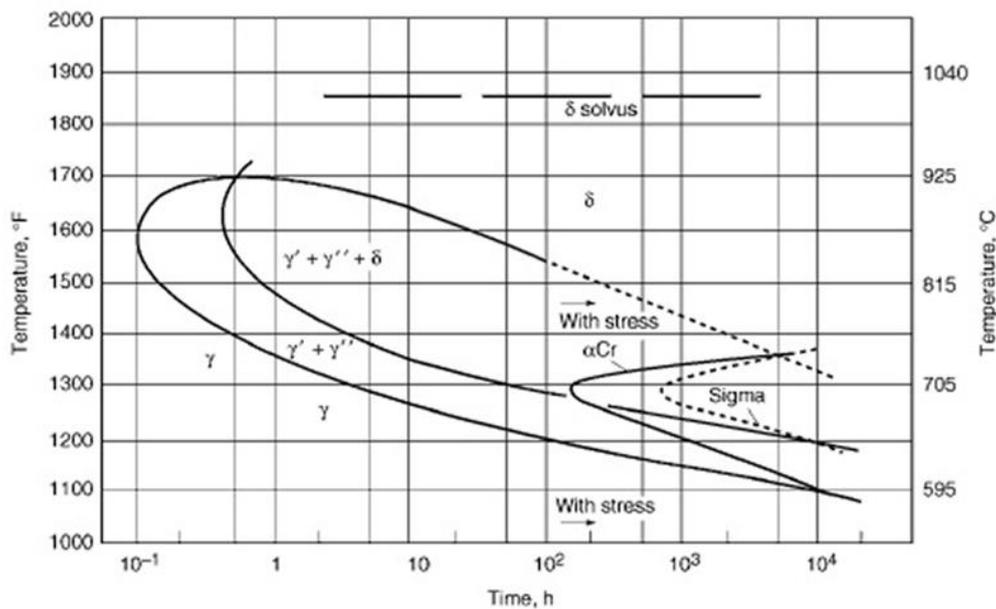


Figura II-31. Diagrama TTT del Inconel 718 [Donachie, 2002].

Sin embargo, para obtener una estructura y propiedades adecuadas con el Inconel 718 es necesario someterlo a diversos tratamientos térmicos en serie. Los tratamientos térmicos más comunes son:

- Recocido: Habitual para recristalizar la estructura deformada y ablandar el endurecimiento producido por la deformación en frío.
- Recocido de solubilización: Disuelve los carburos en solución sólida y agranda el grano para mejorar las características a fluencia.
- Alivio de tensiones: Reduce las tensiones sin necesidad de recristalizar la estructura
- Homogeneización de tensiones: Homogeneiza las tensiones de la deformación en frío sin recristalizar ni reducir apreciablemente la resistencia introducida por la deformación
- Solubilización: tratamiento previo al envejecimiento para disolver los constituyentes y homogeneizar la aleación.
- Envejecimiento (precipitación): tratamiento para conseguir la máxima resistencia por precipitación de las fases dispersas en la matriz.

Un tratamiento térmico típico para componentes de Inconel 718 forjado constaría de un tratamiento de solubilización a 980 °C durante una hora y enfriamiento en aire seguido de un tratamiento de envejecimiento de dos pasos: 720 °C durante 8 horas con enfriamiento en horno y otro paso a 620 °C durante 8 horas con enfriamiento en aire.

En el caso de componentes de Inconel procedentes de la fundición la estructura requiere de un tratamiento de recocido/normalizado previo a los tratamientos comentados en el caso del material forjado, para homogeneizar el grano y disolver cualquier fase. Este tratamiento consta de 1095 °C durante 1 hora con enfriamiento en aire.

Como se ha comentado, son tratamientos típicos que permiten hacerse una idea del proceso, pero los pasos del tratamiento térmico están sujetos a la normativa que se deba aplicar en cada caso.

6.3 Propiedades del Inconel 718 aportado por láser

La mayoría de los trabajos dentro del aporte láser de Inconel 718 y de materiales equivalentes se han basado en determinar la estructura y las fases que se forman durante este proceso en la reparación de componentes aeronáuticos. De estos componentes, la reparación de álabes de turbinas es la aplicación más estudiada. Al ser un elemento altamente aleado que depende de la precipitación de ciertas fases para obtener buenas propiedades su proceso de fabricación está sujeto a tratamientos térmicos posteriores obligatorios para mejorar dureza y propiedades mecánicas, pero siempre partiendo de un sustrato con grano homogéneo y con las fases disueltas algo que no ocurre cuando se aporta el material mediante DED.

El níquel, componente principal del Inconel 718, no presenta problemas en cuanto la absorción del haz láser por lo que se puede utilizar un amplio rango de longitudes de onda para su procesamiento por láser (Figura II-32).

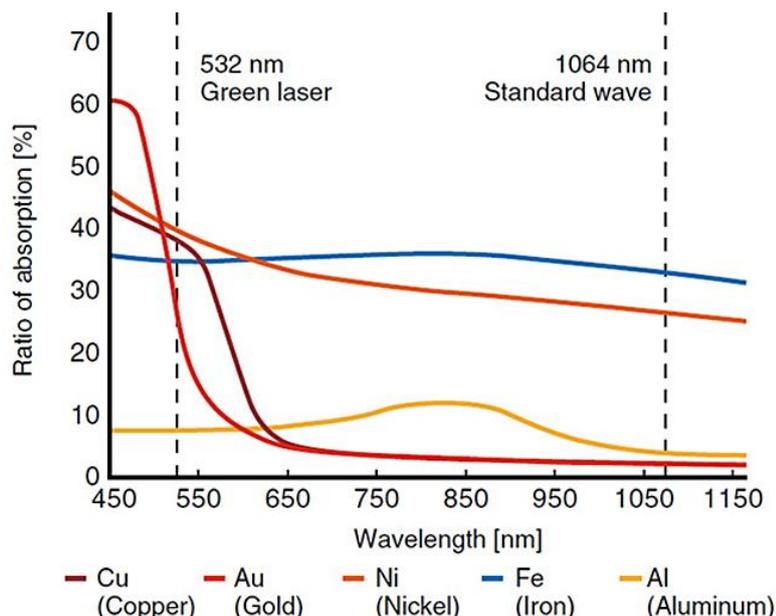


Figura II-32. Absorción del níquel a diferentes longitudes de onda del haz láser [KEYENCE, 2019].

Debido al gradiente térmico y la rápida solidificación del proceso, la estructura típica en el aporte láser es de grano columnar dendrítico o mixta columnar-equiaxial (Figura II-33). Como ya se ha comentado, esta estructura de grano columnar provoca anisotropía en las propiedades mecánicas. Sin embargo, algunos trabajos han obtenido estructuras monocristalinas utilizando superaleaciones en aplicaciones de reparación de álabes de turbinas mediante DED [Rottwinkel, 2014], [Kaielerle, 2017].

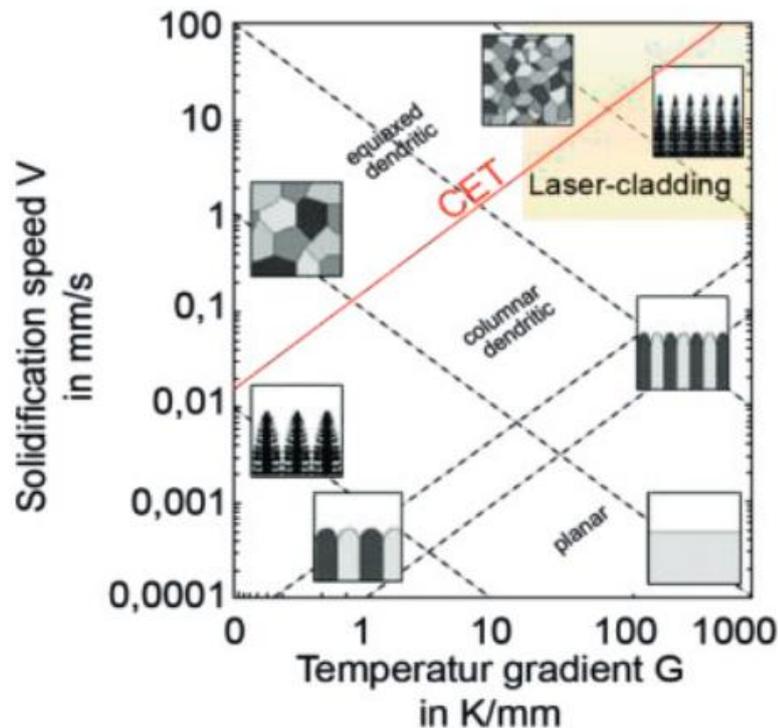


Figura II-33. Zona de transición columnar a equiaxial [Rottwinkel, 2014].

Aunque en general se obtienen aportes libres de defectos, el material aportado presenta fase Laves en su estructura y mínima segregación pudiendo endurecerse por envejecimiento, aunque la estructura columnar se mantiene [Zhai, 2019]. También pueden aparecer carburos y fase δ dependiendo de la potencia y el tiempo empleados en el proceso [Parimi, 2014]. La fase δ puede producir concentración de tensiones y reducción de la elasticidad del material provocando una reducción de la vida útil del material a fatiga. En el caso de la fase Laves, si la fase está presente en tamaños menores a la micra no se presentan efectos negativos en las propiedades del material [Sui, 2019]. Esto se puede obtener controlando el gradiente térmico y la velocidad de enfriamiento (Figura II-34).

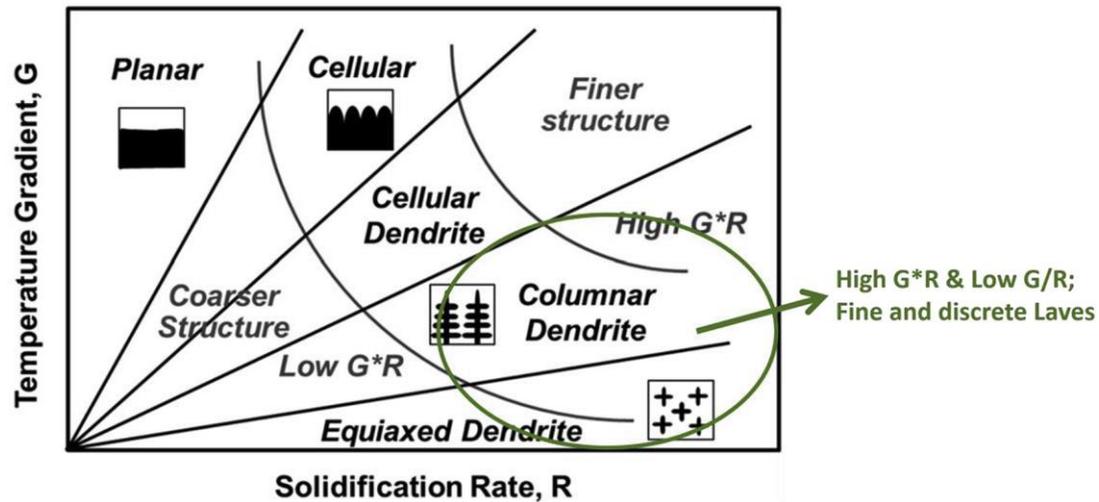


Figura II-34. Tipo de estructura del Inconel 718 dependiendo de la velocidad de enfriamiento y el gradiente térmico [Sui, 2019].

Las estructuras obtenidas pueden ser forjadas en caliente siempre y cuando se traten térmicamente de forma que se elimine completamente la fase Laves que lo fragiliza [Qi, 2009], pero en ese caso se pierden las propiedades del sustrato si este ha sido tratado o forjado previamente.

En cuanto a las propiedades mecánicas del material aportado, estas son inferiores a las obtenidas con Inconel 718 forjado y presentan anisotropía, aunque tras el tratamiento térmico de envejecimiento su dureza puede ser similar y sus propiedades mecánicas mejoran [Zhai, 2019]. Sin embargo, dependiendo de la estrategia de aporte se obtendrán peores o mejores propiedades [Taberero, 2011]. En caso de porosidades estas pueden ser eliminadas por HIP, mejorando las propiedades mecánicas. Este proceso sumado a varios tratamientos térmicos (homogenización + solubilización + envejecimiento) transforma la estructura columnar en equiaxial (isotropía), disuelve la fase Laves y precipita la fase γ'' mejorando las propiedades del material aportado [Zhong, 2016].

6.4 Mecanizado del Inconel 718

Los principales problemas que aparecen durante el mecanizado de Inconel 718 son debidos a la elevada temperatura que generan los componentes abrasivos del material (elevado contenido en Níquel, 50-55%, y Cromo, 17-21%) en el filo de corte de la plaquita, lo que repercute en unos elevados índices de desgaste, marcas y rotura de la plaquita. Estos factores contribuyen a la reducción de la duración de la herramienta y a la elevada deformación del filo de corte, incluso a bajas velocidades de corte.

Otro problema asociado con el Inconel es su tendencia a sufrir malformaciones causadas por su sensibilidad metalúrgica a la tensión residual y al efecto de auto templado que se origina durante la operación de mecanizado. Las aleaciones de base níquel, forman parte de los materiales conocidos como difíciles de mecanizar, grupo S (naranja) según clasificación ISO de materiales junto a las aleaciones de Titanio [Polvorosa, 2017-a].

Por ello, el mecanizado de Inconel 718 supone bajas velocidades de corte por un lado y rápido desgaste de herramienta por otro, lo que resulta en largos tiempos de mecanizado y altos costes de fabricación. Además, las virutas que se generan durante el mecanizado normalmente son cintas alargadas en forma de maraña que se enredan fácilmente generando problemas [Klocke, 2011].

Por otro lado, las altas temperaturas y las cargas en el filo de la herramienta llevan a astillar el filo ya que la presión de corte específica supera los 3000 N/mm². El desgaste de flanco y notch de las herramientas al mecanizar estos materiales están directamente relacionados con la dureza y el tamaño de grano respectivamente [Polvorosa, 2017-b]. Por lo tanto, está altamente recomendado lubricar la herramienta a alta presión [SANDVIK_HRSA, 2019], algo que hay que tener en cuenta ya que, como se ha explicado anteriormente, el uso de la taladrina supone un problema para la hibridación del aporte por láser + mecanizado.

Debido principalmente a estas dificultades, son numerosos los autores que han estudiado el mecanizado del Inconel 718 con el fin de aumentar su productividad empleando mecanizado a alta velocidad [López de Lacalle, 2000], desarrollando modelos de predicción de fuerzas para las herramientas de fresado [Calleja, 2013] o definiendo gráficos de estabilidad para predecir zonas libres de vibraciones [Urbicain, 2013].

Otro problema añadido en el mecanizado del Inconel 718 es la baja rigidez de algunos componentes como los del sector aeronáutico. Esto deriva en vibraciones que pueden originar chatter regenerativo. Con el fin de obtener condiciones libres de vibraciones en el mecanizado de partes de baja rigidez es común la aplicación de modelos de estabilidad tridimensional. La finalidad de estos modelos es evitar la aparición de chatter regenerativo mediante la selección de unas condiciones de corte estables (profundidad de corte axial y radial, y velocidad de corte) [Campa, 2007].

A todos estos problemas que presenta el mecanizado del Inconel 718, hay que sumar los que presenta la estructura obtenida por el aporte láser DED. El material aportado por láser presenta mayores fuerzas de corte tanto en torneado

como en fresado [Calleja, 2018] con una rugosidad de la parte mecanizada similar al material base.

Es de destacar el estudio realizado por Ostra et al. [Ostra, 2019] empleando la misma máquina híbrida que en esta tesis. En dicho trabajo se realiza un estudio comparativo de las fuerzas de corte generadas en el proceso de mecanizado de paredes de Inconel 718 fabricadas por aporte láser DED y del mismo material producido mediante forja convencional (Figura II-35).

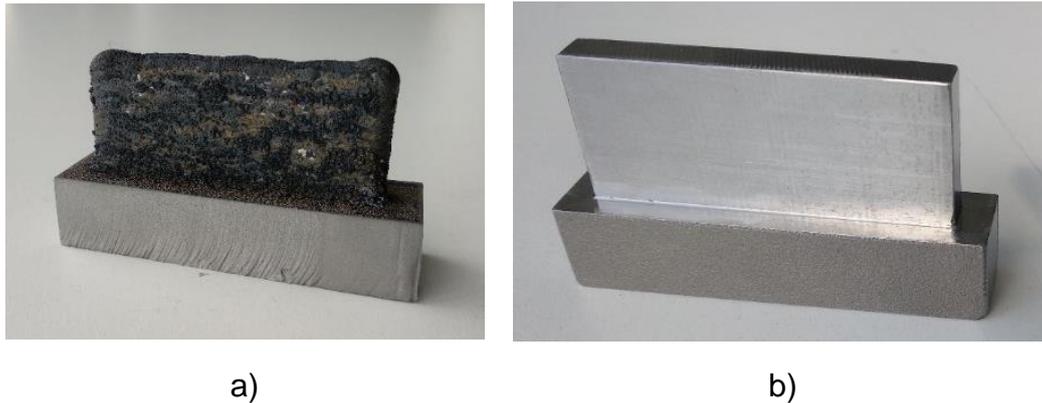


Figura II-35. Paredes fabricadas: a) Aporte por láser; b) Mecanizando material forjado [Ostra, 2019].

Ostra et al. obtienen fuerzas y momentos flectores variables durante las primeras pasadas de mecanizado en las paredes fabricadas por DED debido a la ondulación de la superficie. En las pasadas de mecanizado efectuadas con una profundidad de corte constante obtienen fuerzas y momentos superiores hasta en un 40% con respecto al mismo material forjado (Figura II-36). Además, las virutas generadas en el mecanizado de la pared por aporte láser son más cortas y rectas en comparación con las obtenidas para la pared forjada (Figura II-37).

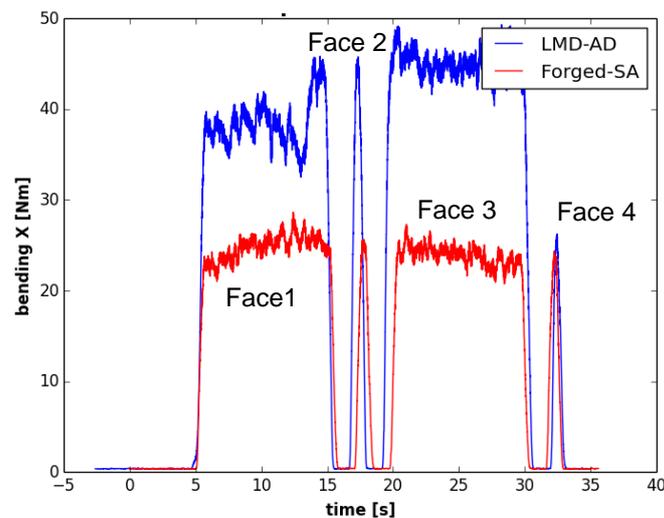
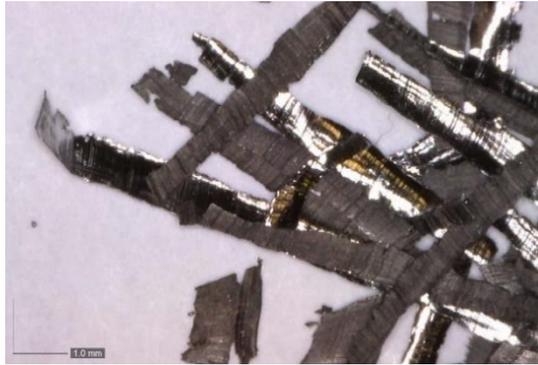


Figura II-36. Evolución del momento flector con el tiempo a profundidad de corte constante en todo el contorno de la pared [Ostra, 2019].



a)



b)

Figura II-37. Virutas obtenidas durante el mecanizado de las paredes: a) Pared por aporte láser; b) Pared forjada [Ostra, 2019].

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III: ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE APORTE POR LÁSER

1 Introducción

El estudio experimental se ha realizado mediante pruebas de distintos elementos de forma separada con el fin de reducir el número de factores del diseño experimental en la caracterización del proceso. Para ello, se propone una metodología experimental en la que se ha ido avanzando secuencialmente, desde la caracterización de los elementos que componen el sistema de aporte (incluyendo el alimentador de polvo y el cabezal), hasta la realización de ensayos para obtener geometrías de paredes delgadas. De esta manera, el objetivo de este estudio ha sido conocer las características del sistema de aporte del material empleado, así como determinar la ventana de parámetros adecuada para ejecutar el proceso en condiciones óptimas. Por último, se han estudiado las propiedades del material resultante del proceso de aporte analizando la integridad estructural del material y las propiedades mecánicas.

Así, a lo largo del siguiente capítulo se describirá inicialmente el equipamiento experimental y los materiales utilizados. Seguidamente se describirá el estudio experimental que ha servido para optimizar el proceso de aporte desde el punto de vista del aporte de polvo y la fase inicial y final del proceso de aporte. Este estudio, ha consistido en primer lugar en el análisis del comportamiento del flujo de polvo durante el proceso, a través de la monitorización del polvo. En segundo lugar, se ha analizado la distribución del polvo a la salida de los diferentes tipos de boquillas para determinar el punto de máxima concentración de polvo, y, por lo tanto, el punto óptimo de la distancia de trabajo para optimizar la eficiencia del polvo durante el proceso de aporte. Por último, se han analizado los valores de la velocidad de avance del cabezal y la potencia láser en las fases inicial y final del proceso de aporte, para determinar el tiempo necesario para alcanzar unos valores constantes de estas variables, y, por lo tanto, tener un proceso estable.

Tras este estudio experimental, se ha caracterizado el proceso de aporte a través de la obtención de ecuaciones que relacionan los parámetros principales del proceso (potencia, avance y flujo de polvo), con la geometría de cordones individuales, para así poder optimizar los parámetros y poder desarrollar un modelo geométrico que sea capaz de predecir la geometría de un recubrimiento o de un aporte multicapa. Durante esta caracterización, se ha estudiado por un lado el efecto que tiene la inclinación del cabezal de aporte utilizando diferentes tipos de boquillas, y, por otro lado, el efecto de realizar un aporte no perpendicular, ya que, para la fabricación de geometrías complejas, puede ser

necesario utilizar este tipo de condiciones. Además, se han estudiado diferentes estrategias para fabricar una pared inclinada, con el objetivo de definir los ángulos de inclinación que se pueden fabricar con el equipamiento utilizado. Por último, se han caracterizado la estructura y las propiedades mecánicas del material aportado. Los resultados obtenidos se han comparado con los del mismo material forjado.

2 Equipamiento experimental

2.1 Máquina híbrida: IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process

El desarrollo de la metodología planteada en este trabajo se ha realizado íntegramente en la máquina híbrida IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process (Figura III-1). Esta máquina combina los procesos de fresado y torneado con el proceso de aporte láser mediante inyección de polvo. Se trata de un concepto similar a otros sistemas que existen en el mercado, variando únicamente en su configuración cinemática. En concreto, el sistema de Ibarmia emplea una configuración de columna móvil lo que permite fijar las piezas a la mesa mientras que el resto de los ejes se desplazan sobre ella. Esta configuración permite trabajar en componentes de mayor tamaño y, sobre todo, de mayor longitud. En cualquier caso, el desarrollo planteado se podría extrapolar a cualquier otro sistema que combine los procesos laser DED y mecanizado en la misma máquina.

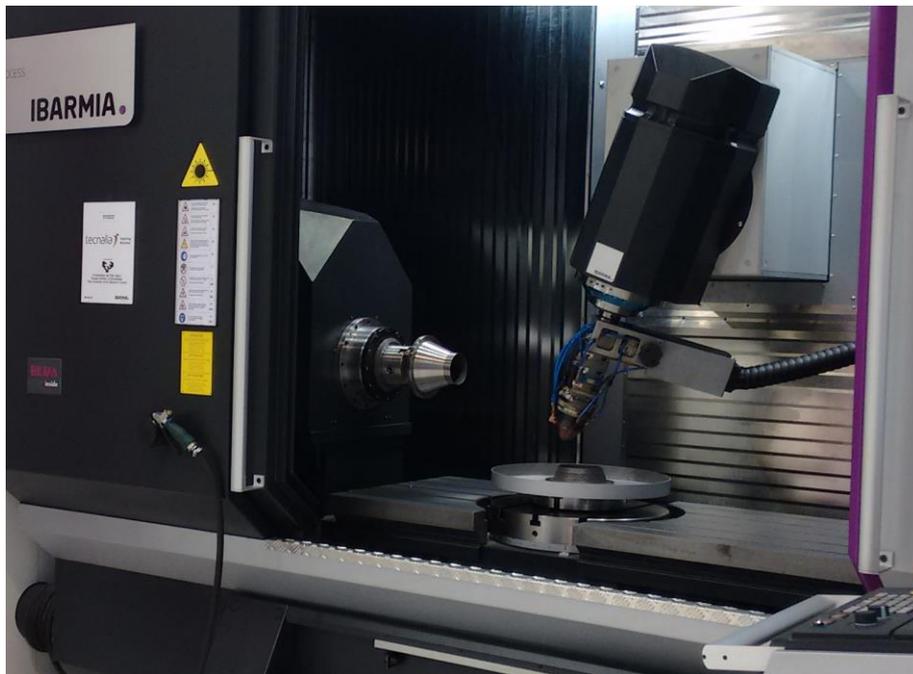


Figura III-1. IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process

La máquina híbrida de Ibarria consta de un cabezal láser, un alimentador de polvo de disco y un generador láser. La Figura III-2 muestra el esquema básico de la configuración del equipo. El cabezal láser está unido a un portaherramientas HSK que le permite acoplarse al husillo de la máquina. El cabezal láser dispone también de un cambiador y almacén propio (aparte del almacén de las herramientas de mecanizado) que permite utilizarlo como una herramienta más de la máquina pudiendo acoplarlo o retirarlo según se quiera realizar aporte láser o mecanizado. La fibra del guiado del haz láser, los tubos de inyección del polvo y los tubos de agua para la refrigeración del cabezal están conectados al cabezal protegidos contra salpicaduras dentro de un cable umbilical extensible. La configuración de la máquina permite trabajar en 3, 4 o 5 ejes según se utilicen mesa fija, divisor vertical o torno horizontal con la inclinación del cabezal mediante rotación del eje B. Por tanto, la configuración puede ser RLLLR (torno) o LLLR (mesa fija). El eje B de rotación dispone de un recorrido máximo de 105° para mecanizado y 45° para aditivo.

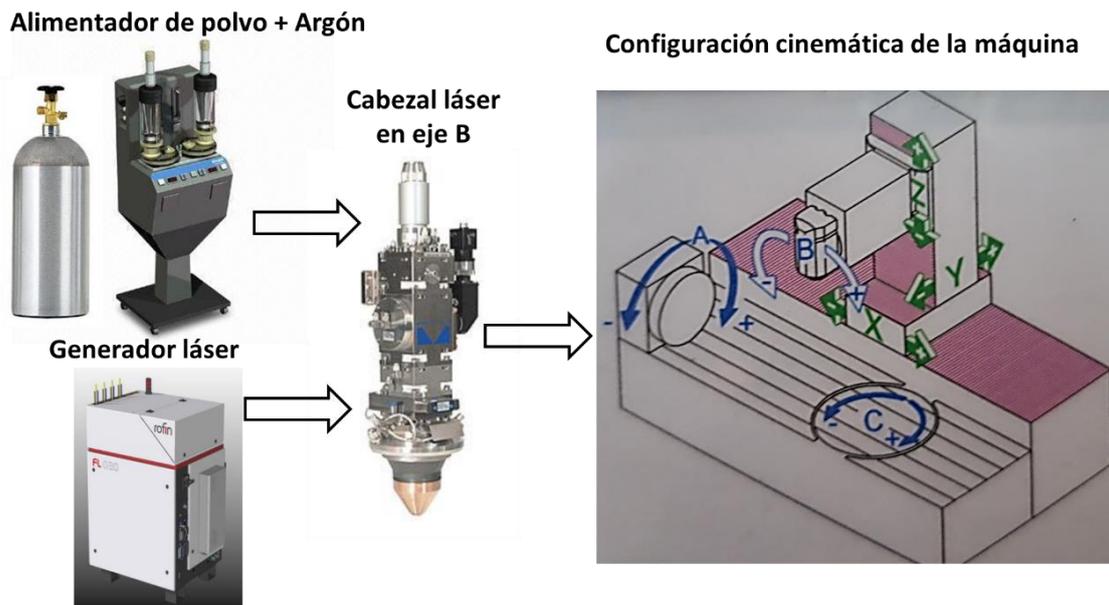


Figura III-2. Esquema de la configuración del equipo.

2.1.1 Cabezal láser

La máquina híbrida consta de un cabezal láser Precitec YC52LMD para aplicaciones de hasta 6 kW, con un colimador de focal 125 mm y una lente de focalización de 250 mm (Figura III-3). Una vez el haz láser entra en el cabezal, pasa por las lentes colimadoras y focales para focalizar el haz en un punto de máxima densidad de potencia (Figura III-3.a) tras lo cual comienza nuevamente a divergir y perder densidad de potencia.

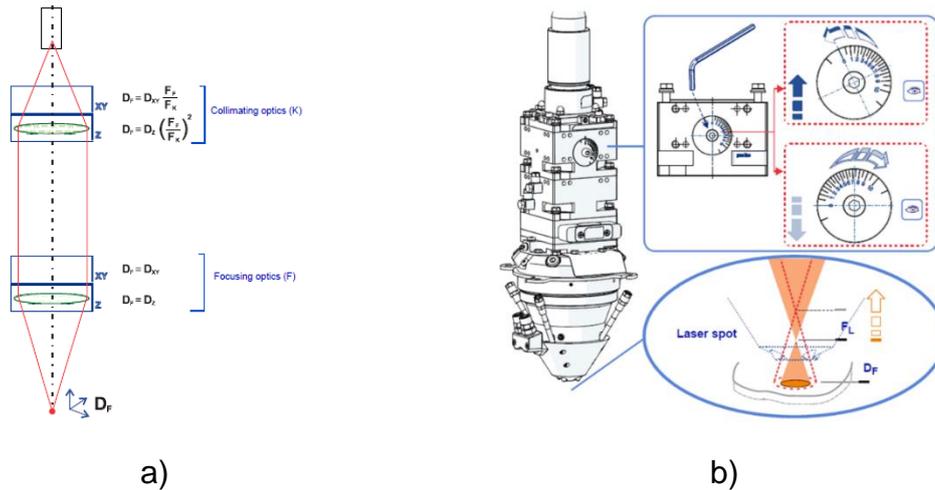


Figura III-3. a) Esquema de las lentes colimadora y focal; b) Ruleta focal del cabezal láser.

El cabezal presenta un mecanismo de ajuste focal mediante una ruleta, con un rango de valores entre -2 a 10, que permite mover la lente colimadora y variar la distancia focal del haz, generando así diferentes diámetros del spot en la superficie sin necesidad de mover el cabezal verticalmente (Figura III-3.b). Combinando la variación del diámetro del spot con la potencia láser utilizada, se pueden obtener distintos tamaños del baño fundido a la distancia de aporte.

Este cabezal dispone para la inyección de polvo de boquillas modulares intercambiables (Figura III-4) permitiendo emplear tanto una boquilla coaxial discreta de 4 vías como una boquilla coaxial continua de distinto tamaño de ranura (0,5, 0,75 y 1,00 mm). Según los datos de la hoja técnica, la distancia de trabajo está entre 12 a 14 mm de distancia del sustrato y el diámetro del spot láser a una distancia entre 10 a 20 mm del sustrato es de 2 a 4 mm dependiendo del valor de la ruleta focal, obteniendo mayor diámetro a mayor valor de esta.

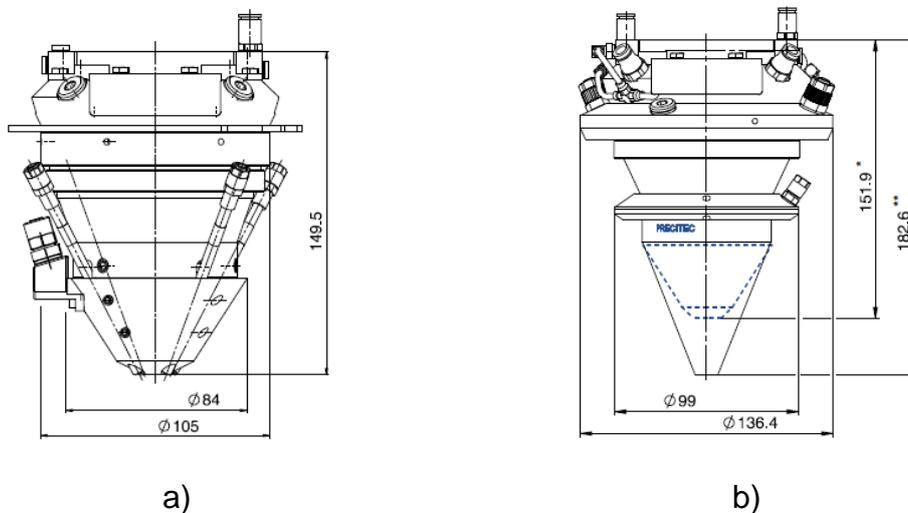


Figura III-4. Dimensiones de las boquillas utilizadas: a) Módulo de la boquilla discreta de 4 vías; b) Módulo de la boquilla coaxial continua de 151.9 mm de longitud.

2.1.2 Alimentador de polvo

La máquina híbrida consta de un alimentador de disco Sulzer Metco TWIN-10-C (Figura III-2), con un agitador dentro de las tolvas para evitar el apelmazamiento del polvo en la salida de la tolva al disco y con un sistema calefactor de hasta 60 grados para secar el polvo y evitar problemas asociados a la humedad retenida. La tolva tiene una capacidad de 5 litros y la cantidad de polvo inyectado es regulado mediante la velocidad de rotación del disco que se regula por el porcentaje de la velocidad de giro con respecto a la máxima velocidad de giro que puede alcanzar. El disco traslada el polvo desde la tolva hasta el inserto en donde entra dentro del flujo del gas de arrastre siendo transportado por este hasta el cabezal láser.

2.1.3 Generador láser

La máquina híbrida consta de un generador láser de estado sólido modelo Yb-Fiber Rofin FL030 de 3 kW con una longitud de onda continua de 1,07 μm del fabricante Coherent (Figura III-2). A pesar de que el generador láser proporciona 3 kW de potencia máxima, se recomienda no superar el 90% de ese valor para evitar sobrecargar el equipo. El láser multimodo resultante es transportado al cabezal mediante una fibra óptica de 400 μm , 20 m de longitud y con acopladores refrigerados directamente por agua a la entrada y salida.

2.1.4 Gas de arrastre y protección

Se ha utilizado el mismo gas tanto para el arrastre del polvo como para el gas de protección: argón comprimido extrapuro 3X50 de la compañía Praxair-Nippon Gases con una concentración mayor del 99,997%. El caudal ha sido suministrado mediante un sistema que consta de un regulador de gas de dos etapas con manómetro y caudalímetro mecánico incorporados.

2.2 Materiales

El material de aporte utilizado ha sido una aleación base níquel 718 en polvo de la compañía Flame Spray Technologies (FST). Este material presenta una granulometría de entre 45 a 150 μm y es químicamente equivalente al Inconel 718 (Tabla III-1).

Tabla III-1. Composición química del polvo y el sustrato (wt. %).

	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Ti	Al
Polvo	52,8	18,5	18	4,8	3,5	0,75	0,3
Sustrato	53,5	18,7	17,7	5	2,9	0,94	0,58

Las características principales del polvo de aporte son las siguientes:

- Fluidez (s/50g): 12,8
- Densidad del material ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$): 8,19
- Densidad compactada del polvo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$): 4,43
- Granulometría/Tamaño de partícula d_{50} ; $d_{90}-d_{50}$; $d_{50}-d_{10}$ (μm): 93; 39; -26
- Morfología: Partículas mayormente esféricas, con presencia de partículas con forma cilíndrica y ocasionalmente irregulares. Baja presencia de satélites (Figura III-5).



Figura III-5. Morfología de la partícula de la aleación 718.

Como sustrato se ha utilizado una placa forjada de la aleación ATI 718 normalizada y de espesor 13,8 mm, suministrada por la compañía Neo-Nickel. Este material es químicamente equivalente al Inconel 718 (Tabla III-1) y presenta las siguientes características mecánicas y estructura (Figura III-6):

- Tensión de rotura (MPa): 869
- Límite de deformación permanente (MPa): 430
- Alargamiento de rotura (%): 54,5



Figura III-6. Estructura de la placa forjada ATI 718.

2.3 Equipamiento de medición y caracterización

A lo largo de este trabajo se han utilizado diferentes equipamientos para la medición geométrica y la caracterización del material aportado, que se describen a continuación:

- Visión 3D: En este trabajo se empleó un escáner de luz estructurada PhoXi® 3D de la empresa Photoneo modelo XS con una precisión de calibración de 25 micras y una distancia entre puntos de medición de 57 micras.
- Balanza: Báscula de precisión PCB 2500-2 del fabricante Kern con capacidad de 2,5 kg y una resolución de 0,01 g.
- Equipo de tracción: Se ha empleado una máquina Universal de ensayos electromecánica modelo 5500R6025 de la marca INSTRON con capacidad máxima de 100kN. Esta máquina puede emplearse tanto con probetas cilíndricas roscadas como con probetas planas de hasta 12 mm de espesor.
- Microscopio y software: El microscopio empleado ha sido el modelo SMZ-143 del fabricante Motic junto con el software Captiva® del fabricante Clemex para la adquisición de imágenes y la medición de dimensiones.
- Sensor de medición del flujo de polvo (Figura III-7): El sensor empleado ha sido el sensor de flujo FlowWatch de Medicoat para la adquisición de datos. Este sensor mide de forma indirecta el flujo de polvo ya que el voltaje de la señal analógica de salida (entre 0 y 10 V) depende de la sombra proyectada de las partículas del polvo metálico del flujo en un fotorresistor.



Figura III-7. Sensor de flujo FlowWatch de Medicoat.

3 Optimización del proceso de aporte

3.1 Análisis del flujo de polvo

Este estudio se ha centrado en monitorizar el flujo de polvo mediante el uso del sensor FlowWatch, con el fin de detectar posibles variaciones durante el proceso de aporte, así como para determinar el tiempo de espera necesario desde el inicio de la alimentación del polvo metálico hasta la estabilización del flujo. Además, mediante la monitorización del flujo de polvo, se ha evaluado la

variación del mismo durante un proceso de aporte de larga duración debido a la variación de la cantidad de polvo en la tolva del alimentador de polvo.

Como se ha explicado en el estado del arte, los alimentadores volumétricos requieren de una calibración previa que relacione el giro del disco con el flujo de polvo que es suministrado. Esta relación entre el flujo de polvo y el porcentaje de rotación del disco es prácticamente lineal (Figura III-8).

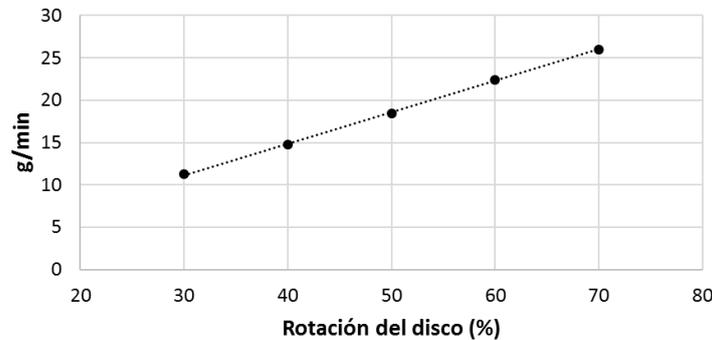


Figura III-8. Relación lineal típica en la calibración del flujo suministrado en función de la rotación del disco del alimentador volumétrico.

Aunque esto puede hacerse fácilmente pesando el polvo recogido durante varios minutos en un contenedor y obteniendo un promedio en $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$, este método se debe repetir habitualmente ya que cambios en el material, forma y fluidez de la partícula influyen fuertemente en la cantidad de polvo suministrado. Este hecho justifica la necesidad de monitorizar el flujo de polvo con un sensor durante el proceso a fin de asegurar un flujo estable y determinar su valor de forma más exacta.

Una vez empieza el alimentador a suministrar el flujo de polvo, este tarda un tiempo en alcanzar los inyectores del cabezal. Además, tanto el inicio como el final del flujo de polvo no son instantáneos ya que dependen de la aceleración/deceleración del disco del alimentador, la distancia del recorrido y la activación/desactivación del gas de arrastre. Por lo tanto, es necesario determinar cuánto tiempo de espera hace falta para que el proceso de aporte no se inicie antes de que el material de aporte sea inyectado.

Para este estudio se ha empleado el sensor de flujo FlowWatch de Medicoat y una tarjeta de datos National Instruments modelo USB 6009 con el software LabVIEW para la adquisición de datos. Los datos han sido adquiridos a una frecuencia de 10 Hz y el flujo ha sido estudiado a distintas velocidades de rotación del alimentador de polvo (en el rango de 10 a 60%) tanto a la salida del alimentador como a la entrada del cabezal. El flujo de polvo se ha medido con el sensor en pruebas de 195 segundos de duración. Para evitar la influencia que pudiera tener en los resultados una distinta granulometría o fluidez del polvo se

han realizado las pruebas con polvo perteneciente al mismo lote. Durante este estudio, el caudal del gas de arrastre se ha mantenido con un valor fijo de $4,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, al igual que en estudios previos [Ramiro, 2018-a] [Ramiro, 2018-b] [Ramiro, 2018-c].

3.1.1 Calibración del flujo de polvo

Para calibrar el flujo de polvo con la rotación del alimentador de polvo, en primer lugar, se ha calibrado el sensor FlowWatch. Para ello, y para así poder relacionar el flujo de polvo con la tensión medida con el sensor, se ha activado el alimentador de polvo durante 195 segundos, y se han realizado mediciones a la salida del alimentador de polvo, empleando diferentes flujos de polvo (Figura III-9).



Figura III-9. Colocación del sensor al lado del alimentador de polvo.

El sensor FlowWatch permite ajustar el rango de medición del voltaje, por lo que se ha determinado como tensión inicial (cuando no hay flujo) un valor de $4,4 \text{ V}$ ya que una tensión inicial de valor cero no permitiría distinguir si la señal corresponde a un funcionamiento incorrecto del sensor. Las señales obtenidas durante estas pruebas pueden verse en la Figura III-10.

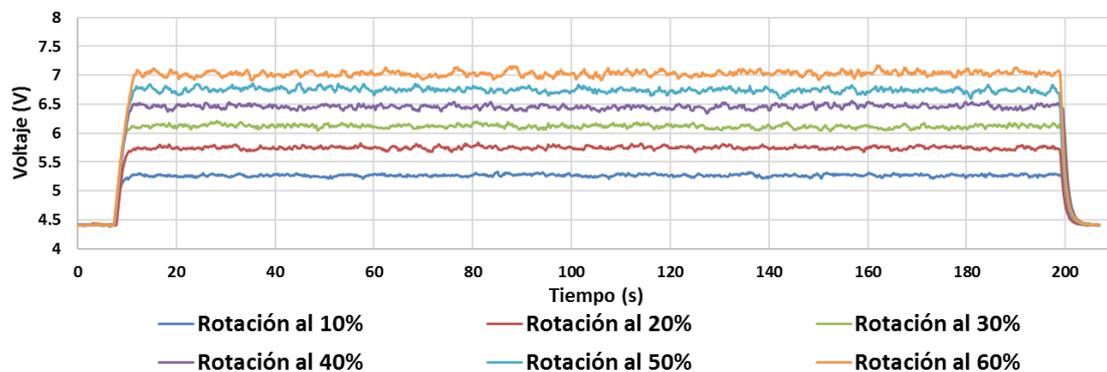


Figura III-10. Valores de tensión obtenidos a distintas velocidades de rotación del disco del alimentador de polvo durante 195 segundos.

Tal y como se puede apreciar en la Figura III-10, se pueden identificar 4 zonas de transición en la señal obtenida por el sensor correspondiente al flujo de polvo. La zona 1 es la comprendida entre la activación del flujo de polvo hasta que el polvo empieza a pasar por el sensor. La zona 2 es la correspondiente al inicio del proceso hasta que el valor de la tensión alcanza un valor estable, para este estudio, se ha considerado hasta alcanzar el 90% del valor promedio calculado. La zona 3 es la zona que comienza en el punto que se desactiva el flujo de polvo (en este estudio, 195 segundos), hasta que el flujo de polvo empieza a descender realmente. Para este estudio, se ha considerado que la zona 3 termina cuando la tensión medida desciende hasta alcanzar el 90% del valor del promedio. Por último, la zona 4 comienza al final de la zona 3, y termina cuando el sensor detecta el final del flujo de polvo y por lo tanto alcanza la tensión inicial (4,4 V).

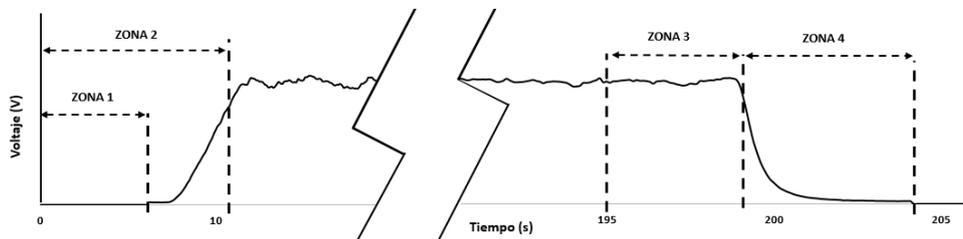


Figura III-11. Representación de las distintas zonas de estudio de la señal de la tensión en cada prueba.

En este caso, para calcular el valor promedio y evitar las zonas de transición, se han utilizado los valores obtenidos en el rango de tiempo comprendido entre 40 y 160 segundos. Los tiempos de cada zona medidos en las pruebas realizadas para la calibración del sensor, se muestran en la Tabla III-2.

Tabla III-2. Tiempos en cada zona para cada rotación del alimentador de polvo.

Rotación	Tiempo en zona 1 (s)	Tiempo en zona 2 (s)	Tiempo en zona 3 (s)	Tiempo en zona 4 (s)
10%	7,7	10,7	4,3	4,7
20%	8	11,1	3,9	4,8
30%	7,1	10,6	4,9	4,5
40%	7,4	10,7	4,6	5,3
50%	7,5	11,1	3,8	5,6
60%	7,4	11,3	4,1	5,6

Una vez definidas las zonas de transición del flujo de polvo, se puede relacionar el flujo de polvo real con la tensión medida del sensor, para lo que se ha empleado el método iterativo de la bisección. Este algoritmo se emplea en

funciones continuas dentro de un intervalo que tenga signos opuestos y trabaja dividiendo el intervalo a la mitad y seleccionando el subintervalo que tiene la raíz encerrando la solución en un intervalo cada vez más pequeño, hasta alcanzar la precisión deseada. Como datos iniciales de cálculo se han empleado el valor promedio del flujo y de la tensión promedio (calculada anteriormente), y se han realizado iteraciones sucesivas hasta obtener como criterio de precisión un $\pm 5\%$ de error relativo del polvo total calculado con la ecuación respecto del polvo total depositado real pesado mediante una balanza de precisión. Para calcular el dato inicial valor promedio del flujo, para cada prueba, se ha pesado el polvo total recogido en un contenedor, y se ha dividido por el tiempo de ensayo. En resumen, este algoritmo consiste en:

1. Obtener la ecuación que relaciona el flujo de polvo con la tensión utilizando los valores promedios.
2. Calcular el total de polvo depositado utilizando la ecuación con los datos de la tensión en todo el rango medido desde el inicio de la prueba hasta el final de la zona 4. Solo es necesario sumar el polvo inyectado en cada instante. Este valor es obtenido multiplicando el flujo de polvo en cada instante por el valor del periodo de tiempo equivalente de la frecuencia de adquisición de datos.
3. Comparar los gramos calculados con los gramos reales y calcular el error relativo.
4. Si el error relativo en todas las rotaciones del alimentador no cumple los requisitos continuar con la iteración. Para ello calcular un nuevo flujo promedio obteniendo un nuevo rango según el algoritmo del método de la bisección y volver a iterar.

En todos los casos, la relación final se ha obtenido en la quinta iteración. La Figura III-12 representa la corrección realizada utilizando este método de calibración.

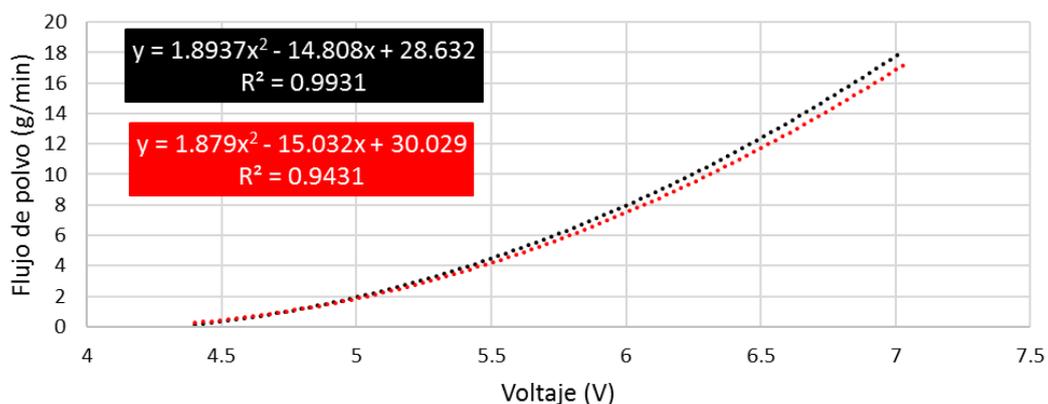


Figura III-12. Ecuación inicial (en negro) y ecuación final (en rojo) tras 5 iteraciones.

La Figura III-13 representa el flujo de polvo obtenido transformando las señales adquiridas de la tensión mediante la ecuación de la 5 iteración.

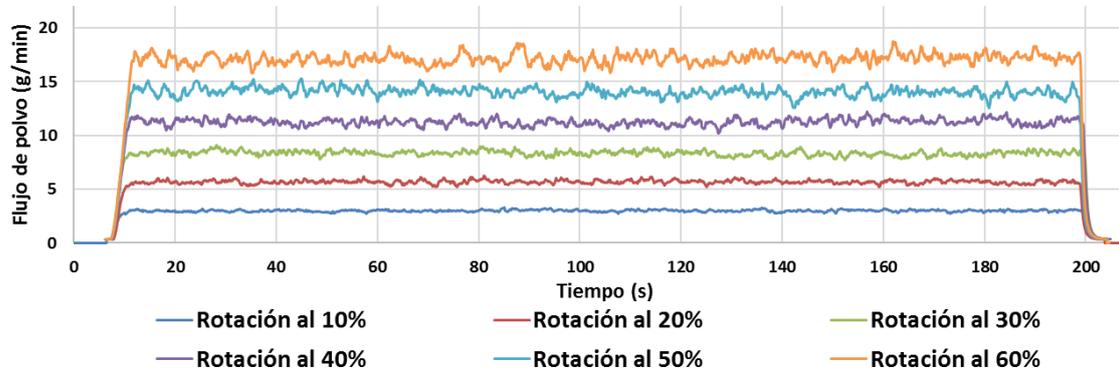


Figura III-13. Datos obtenidos en cada prueba en función del flujo de polvo.

Analizando la desviación típica en todos los casos de la Figura III-13, la desviación en el rango de tiempo entre 40 y 160 segundos está entre el 3,51 y 4,48% del valor del promedio del flujo de polvo.

Los valores del error relativo obtenidos mediante la aplicación de este método pueden verse en la Tabla III-3.

Tabla III-3. Error relativo inicial y tras 5 iteraciones.

Rotación	Error relativo de la ecuación de inicio	Error relativo de la ecuación tras la 5 iteración
10%	18,48%	-3,84%
20%	3,28%	-4,87%
30%	0,30%	-3,42%
40%	9,00%	4,99%
50%	10,37%	4,98%
60%	3,97%	-3,93%

Como resultado, en la Figura III-14 se representa la relación lineal tanto del flujo promedio inicial como del flujo promedio tras 5 iteraciones con el porcentaje de rotación del alimentador de polvo. Los valores finales pueden diferir hasta un 15% del calculado inicialmente.

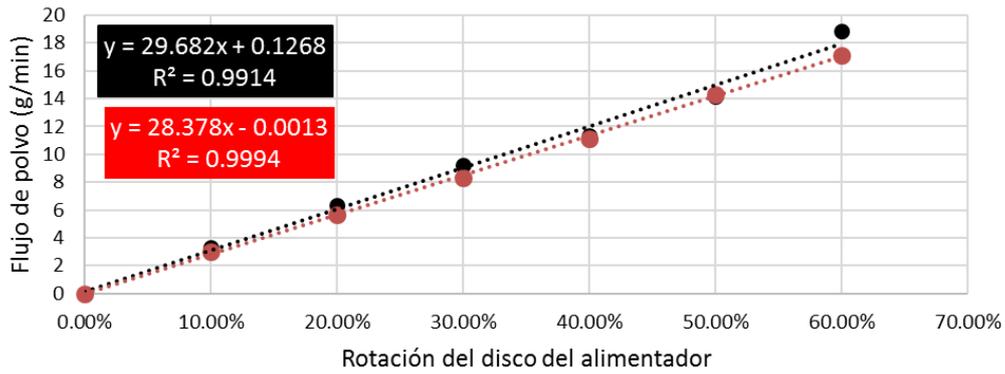


Figura III-14. Relación lineal entre el flujo promedio y la rotación del alimentador de polvo. En negro la relación inicial, en rojo la relación final tras la quinta iteración.

3.1.2 Análisis del flujo de polvo a la entrada del cabezal

Para poder comprobar si hay cambios en el comportamiento del flujo de polvo durante su trayecto, se han realizado mediciones a la entrada del cabezal, para lo que se ha colocado el sensor FlowWatch tal y como se muestra en la Figura III-15.

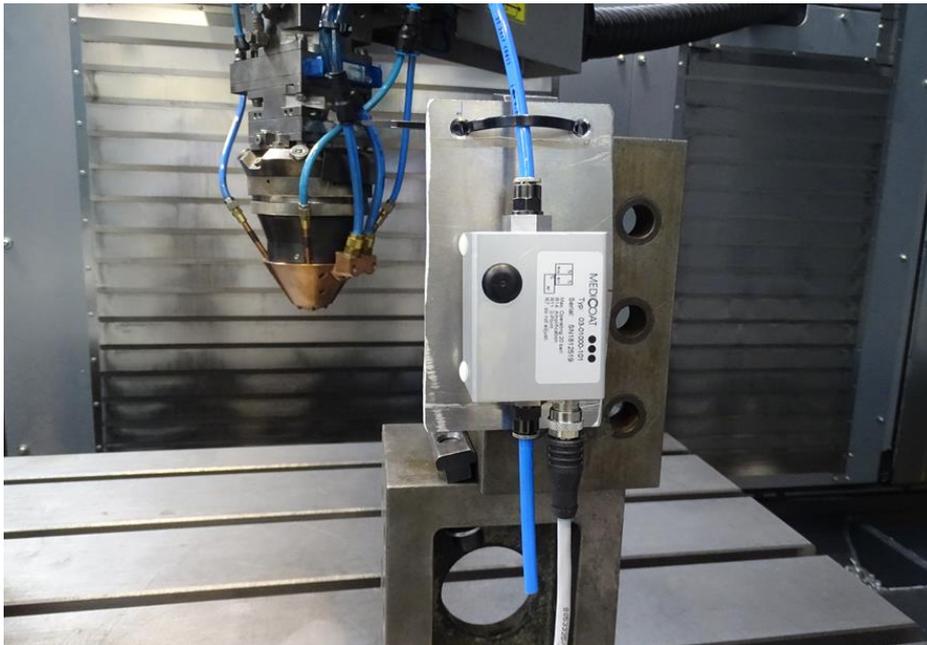


Figura III-15. Colocación del FlowWatch tras conectarlo al conducto de entrada del polvo del cabezal.

Al igual que en el apartado anterior, se ha activado el alimentador de polvo durante 195 segundos, y se han realizado mediciones a la entrada del cabezal, empleando diferentes flujos de polvo. Los resultados se muestran en la Figura III-16.

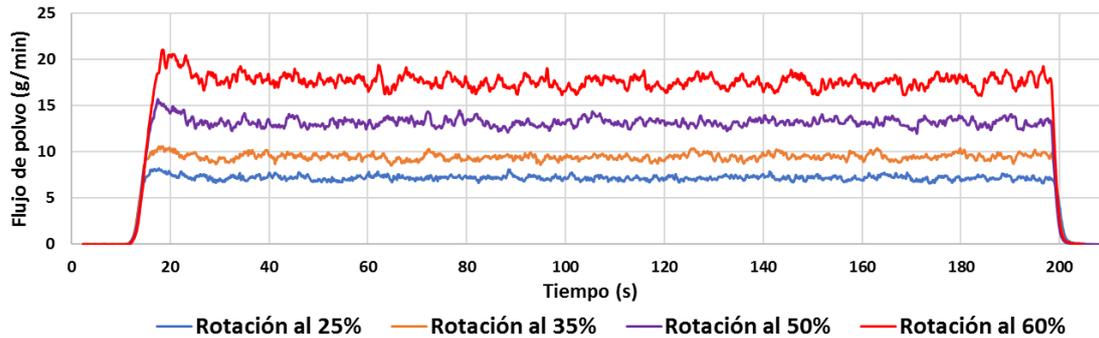


Figura III-16. Datos obtenidos en cada prueba en función del flujo de polvo.

Estos resultados muestran que la tensión sufre al inicio del proceso un incremento desde la zona 2 hasta un pico máximo para luego bajar hasta estabilizarse. Esta nueva zona de estudio se ha definido como “Zona inestable” (Figura III-17). Esta zona inestable abarca desde el inicio del proceso hasta que la señal adquirida vuelve a mostrar un valor igual al promedio del voltaje tras pasar por el valor pico, y representa un momento inicial donde se inyecta más polvo en el proceso debido a una acumulación del mismo durante el inicio del proceso de alimentación de polvo. Esto es debido al tiempo que pasa hasta obtenerse un flujo de gas de arrastre estable, lo que genera que parte del polvo inyectado inicialmente presente una velocidad menor y se acumule. El valor del pico máximo que se ha obtenido durante la experimentación realizada está en un rango de valor entre el 111 al 117% del valor promedio.

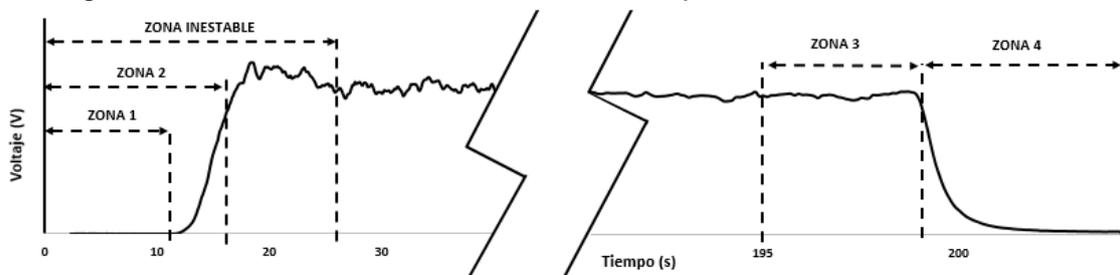


Figura III-17. Representación de las distintas zonas de estudio de la señal de la tensión en cada prueba.

La Tabla III-4 contiene el tiempo que dura cada zona en las pruebas realizadas. Los tiempos son lógicamente mayores con respecto a los obtenidos en el subapartado anterior al medir el flujo a la salida del alimentador de polvo. Sin embargo, los tiempos de la zona 3 son similares, aunque el tiempo de la zona 4 en que el flujo de polvo decrece hasta llegar a cero es mayor. Tras pararse el proceso de aporte, el flujo de polvo continúa 10,8 segundos de promedio hasta alcanzar un valor nulo (tiempo en zona 3 y 4).

Tabla III-4. Tiempos en cada zona para cada rotación del alimentador de polvo.

Rotación	Tiempo en zona 1 (s)	Tiempo en zona 2 (s)	Tiempo en zona inestable (s)	Tiempo en zona 3 (s)	Tiempo en zona 4 (s)
25%	11,1	14,6	21,3	3,9	7,2
35%	11,4	14,8	21,7	4,3	6,5
50%	11,8	15,7	23,1	3,4	6,8
60%	12,1	16,5	23,5	3,6	7,4
Promedio	11,6	15,4	22,4	3,8	7,0

La señal del flujo en el rango de tiempo entre 40 y 160 segundos ha presentado, al igual que en las mediciones realizadas a la salida del alimentador de polvo, una desviación típica en un rango del 3 al 5 % del valor promedio. Empleando la ecuación obtenida mediante el método iterativo a la salida del alimentador de polvo, el error relativo entre la cantidad de polvo pesada y la calculada tampoco ha superado en ningún caso el 5%.

Como consecuencia de este estudio, y a fin de obtener un proceso de aporte lo más uniforme posible, se ha definido un tiempo de espera inicial superior al que se mantiene el flujo en la zona inestable antes de iniciar el proceso de aporte.

Generalmente, al fabricar paredes y recubrimientos por aporte láser se define un tiempo de espera entre pasadas para que la capa o cordón aportado anteriormente se enfríe y así controlar tanto la dilución del proceso como la estabilidad del material aportado. Al saber la relación entre la tensión y el flujo de polvo inyectado es posible calcular la cantidad de polvo acumulado en cada zona y establecer que estrategia es más eficiente: detener el flujo y volver a iniciarlo o, por el contrario, mantenerlo durante el tiempo de espera.

Para obtener un cordón lo más homogéneo posible es necesario que el proceso de aporte se inicie cuando el flujo de polvo se estabiliza. Hay dos opciones para ello. La primera es al sobrepasar la zona 2 si no importa el pico máximo en el valor de flujo que se alcanza posteriormente. La otra es al terminar la zona de inestabilidad si no queremos aportar más material en la zona del valor pico. La primera opción "gasta" fuera del proceso de aporte la cantidad de polvo inyectado en la zona 2 más el polvo de las zonas 3 y 4. La segunda opción "gasta" la cantidad de polvo inyectado en la zona de inestabilidad más el polvo inyectado en las zonas 3 y 4. La cantidad de polvo calculada en cada zona puede verse en la Tabla III-5.

Sumando el polvo total acumulado para cada opción, y calculando a cuánto tiempo equivale esa cantidad comparando con aportar polvo de forma continua (con el flujo promedio correspondiente a cada porcentaje de rotación), se obtienen los tiempos de espera límites a partir de los cuales es más eficiente (desde el punto de vista del material desechado) parar el flujo que continuar inyectando polvo en el tiempo de espera entre cordones.

Tabla III-5. Polvo calculado en gramos por zonas y tiempo equivalente con el promedio del flujo de polvo inyectado.

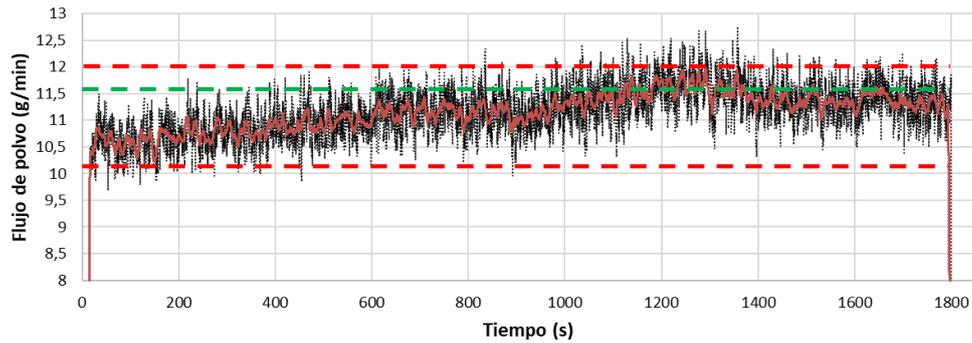
Rotación	Polvo calculado en gramos			Tiempo equivalente con flujo promedio (s)	
	Zona 2	Zona inestable	Zonas 3 + 4	Total Zonas 2 +3 + 4	Total Zona inestable + 3 + 4
25%	0,14	1,01	0,61	6,11	13,23
35%	0,20	1,45	0,80	6,03	13,90
50%	0,30	2,08	0,93	5,44	13,41
60%	0,46	2,25	1,27	5,80	11,79
Promedio	0,27	1,70	0,90	5,85	13,08

Según los resultados de la Tabla III-5, un tiempo de espera de hasta 5,85 segundos entre cordones, desde el punto de vista de la eficiencia del material inyectado, es más eficiente que parar el flujo y volver a empezar si se empieza el proceso de aporte al finalizar la zona 2. Si se hace al superar la zona inestable, el tiempo de espera se incrementa a 13,08 segundos.

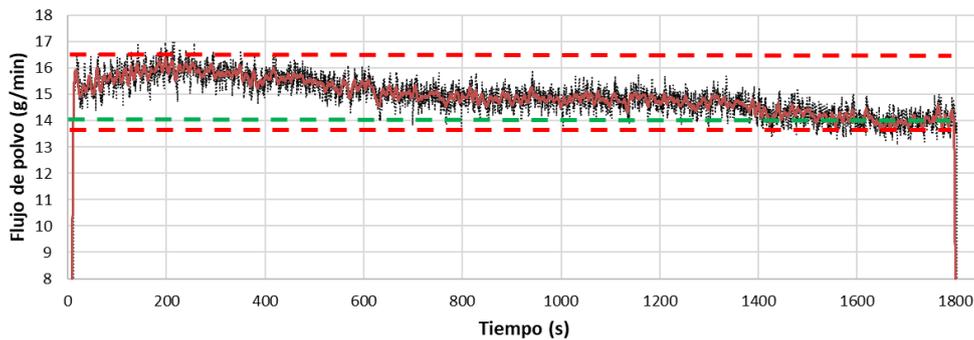
3.1.3 Evaluación de la variación del flujo de polvo en un aporte de larga duración

En este subapartado se ha realizado una evaluación cuantitativa de la variación que sufre el flujo de polvo durante un aporte de larga duración debido a la variación de la cantidad de polvo en la tolva del alimentador de polvo.

Para ello, se han realizado pruebas de 30 minutos inyectando polvo con 2 valores distintos de flujo de polvo, correspondientes a los valores de rotación del alimentador del 40% y del 50%. Para suavizar el ruido de la señal se ha implementado un filtro de media móvil, que se ha empleado como señal de control de la evolución que ha sufrido el flujo de polvo con el tiempo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura III-18.



a)



b)

Figura III-18. Señal adquirida durante el aporte de polvo. En negro la señal adquirida y en rojo la señal tras aplicar un filtro de media móvil. Línea discontinua roja: Límite máximo y mínimo de la señal filtrada. Línea discontinua verde: Valor estimado según la relación lineal rotación-flujo :
 a) Rotación del alimentador al 40%; b) Rotación del alimentador al 50%.

La máxima desviación que se ha obtenido a lo largo de las pruebas de 30 minutos ha sido de un 18% del flujo respecto del valor estimado. Esto es debido a la disminución de la presión que ejerce el polvo de la tolva sobre el polvo suministrado según disminuye su cantidad. Lo cual, provoca variaciones en la fluidez del material afectando finalmente a la cantidad de material que suministra el alimentador. Los resultados obtenidos confirman la necesidad de controlar el flujo de polvo a fin de obtener un proceso de aporte más uniforme. Estas variaciones tienen una tendencia lenta por lo que serían fácilmente controlables implementando un sistema de control basado en las lecturas obtenidas por el sensor FlowWatch y actuando directamente sobre la velocidad de rotación del alimentador de polvo. Por tanto, la rotación del alimentador no es un parámetro fiable para determinar el flujo y se excluye del resto del estudio experimental. En su lugar se incluye el flujo de polvo promedio monitorizado por el sensor FlowWatch.

3.2 Estudio experimental del punto de convergencia y máxima concentración (distancia focal) del flujo de polvo para distintos cabezales.

El objetivo de este estudio ha sido determinar la distancia de máxima concentración de polvo tras la salida de la boquilla. Establecer el punto de máxima concentración es necesario para poder establecer la distancia de trabajo (distancia entre la boquilla y el sustrato), y así, poder maximizar la eficiencia del polvo.

Para poder realizar este estudio se ha desarrollado un utillaje simple para recoger el polvo inyectado. Este útil consta de boquillas de corte por láser de baja potencia intercambiables como sección de entrada a un depósito para el polvo inyectado. Este utillaje está basado en el empleado en el estudio de Cortina et al. [Cortina, 2018-c] en el que también se inyectaba polvo en un contenedor a través de tapas cónicas con agujeros de entrada de distinto diámetro. El fin de dicho utillaje es el de realizar un estudio comparativo de la cantidad de polvo recogido para cada diámetro de entrada a distintas distancias de trabajo y establecer el punto de mayor concentración (Figura III-19). La distancia de aporte es necesaria para definir la distancia del TCP (longitud cabezal + distancia de aporte) de la herramienta para la generación de trayectorias con el CAM.

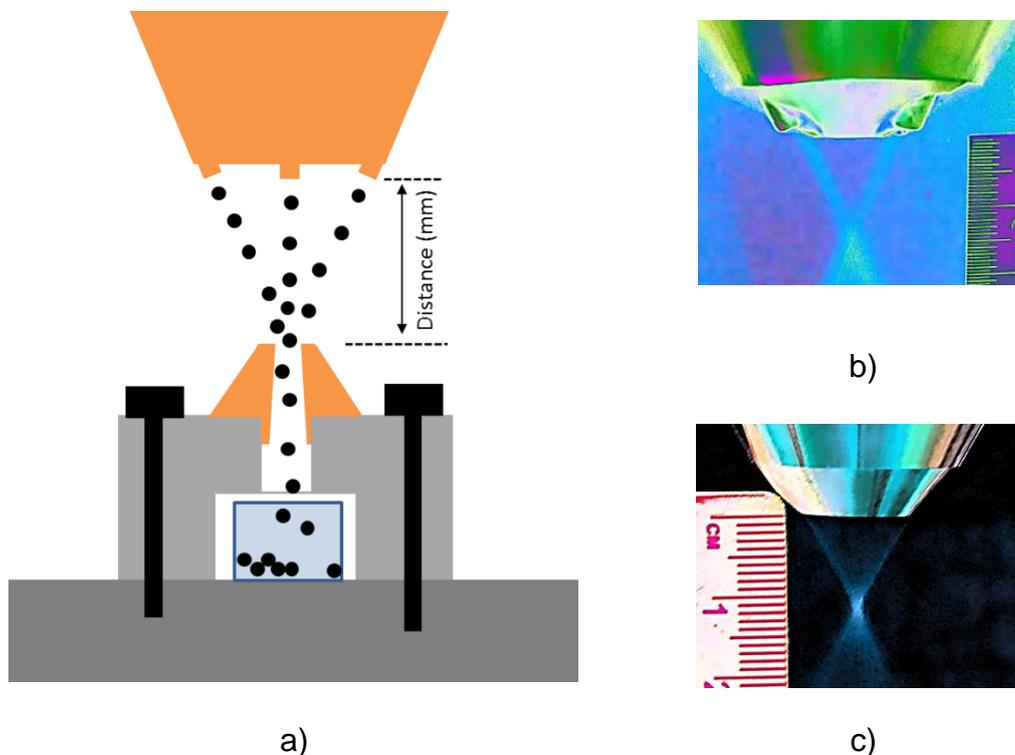


Figura III-19. Utillaje diseñado para el estudio del flujo de polvo. a) Esquema; b) Punto de convergencia del flujo en el cabezal discreto de 4 vías; c) Punto de convergencia en el cabezal coaxial continuo.

Los diámetros de las boquillas de corte son de 0,8, 1,2, 2, 3 y 4 mm (Figura III-20). Las boquillas han sido medidas con calibre y se ha comprobado el diámetro en cada una de ellas utilizando el software Clemex Captiva®. Solo han sido observadas pequeñas desviaciones de circularidad menores de 100 micras. Las distancias a las que se han realizado las pruebas están dentro del rango de 8 a 17 mm de separación de la boquilla respecto del sustrato con una distancia entre cada una de ellas de 1 mm.

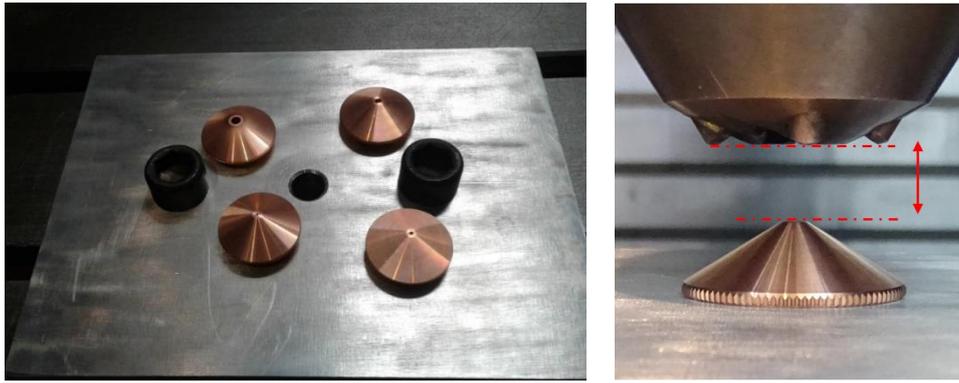


Figura III-20. Boquillas de corte láser con distinto diámetro: a) Imagen de las boquillas y el utillaje; b) Dimensiones de las boquillas.

Basándose en los resultados de estudios anteriores, se ha empleado un caudal de gas de protección $17 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ y un caudal de arrastre de $4,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Caudales de gas de protección menores no generan una atmósfera inerte adecuada libre de oxígeno, y caudales de gas de arrastre distintos de $4,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ producen una menor concentración de polvo en el punto focal. Los efectos del caudal del gas de arrastre en la concentración del polvo son fácilmente observables empleando el mismo utillaje que en este estudio (Figura III-21).

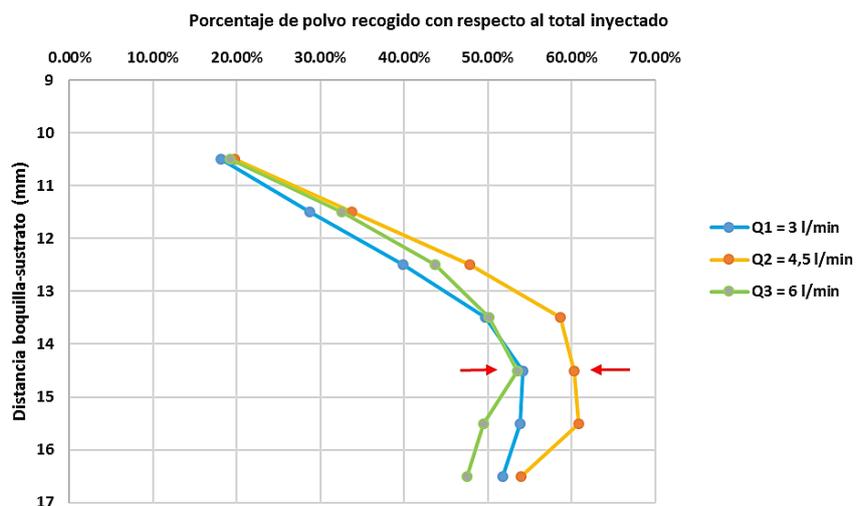


Figura III-21. Efectos del caudal del gas de arrastre en la concentración del flujo de polvo empleando una boquilla discreta de 4 vías. Datos obtenidos empleando una boquilla de 4 mm de diámetro de entrada en el contenedor del utillaje.

Los valores de los flujos de los gases se han ajustado en función de resultados experimentales obtenidos en trabajos previos y que han sido validados con el polvo empleado en esta tesis. Tanto el flujo del gas de protección como el de arrastre se han mantenido constantes durante todos los ensayos presentados en este trabajo.

Los parámetros utilizados para este estudio se muestran en la Tabla III-6. Se ha realizado el estudio con dos flujos máscicos de polvo distintos para valorar el efecto del flujo máscico de polvo en la concentración de material en el punto focal.

Tabla III-6. Valores de los parámetros utilizados.

Parámetros	Valores
Caudal del gas de arrastre ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	4,5
Caudal del gas de protección ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	17
Temperatura de la Tolva ($^{\circ}\text{C}$)	60
Flujo máscico de polvo ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)	11,3 y 18,4
Tipo de Boquilla coaxial Discreta	Discreta de 4 vías
Tipo de Boquilla coaxial Continua	Ranura de 1,00, 0,75 y 0,50 mm
Diámetro de la boquilla del contenedor (mm)	1,2, 2, 3 y 4
Rango de la distancia de aporte (mm)	8 a 17

Como resultado, se ha medido el polvo depositado con cada diámetro. Una vez obtenido el peso del polvo depositado durante 195 segundos para cada diámetro de entrada en el contenedor, se ha calculado la distribución media del flujo de polvo respecto al total inyectado a las distancias establecidas en el ensayo. También se ha determinado la distancia a la cual la concentración de polvo es máxima para cada boquilla del cabezal utilizada en el ensayo.

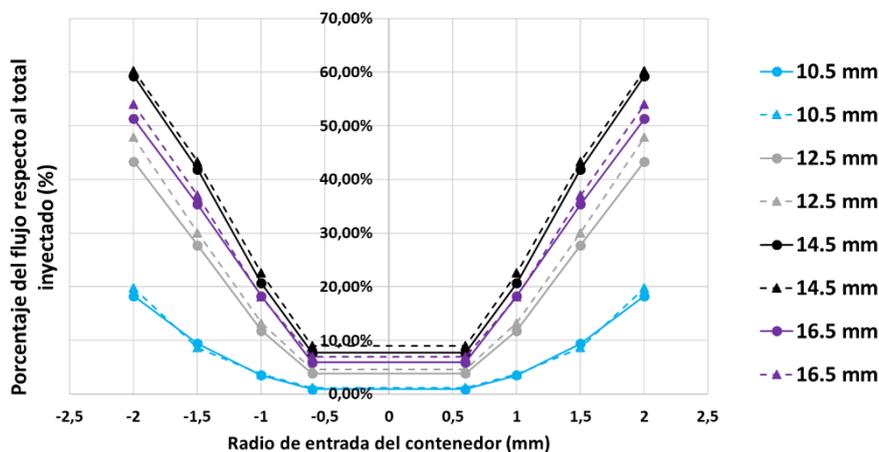
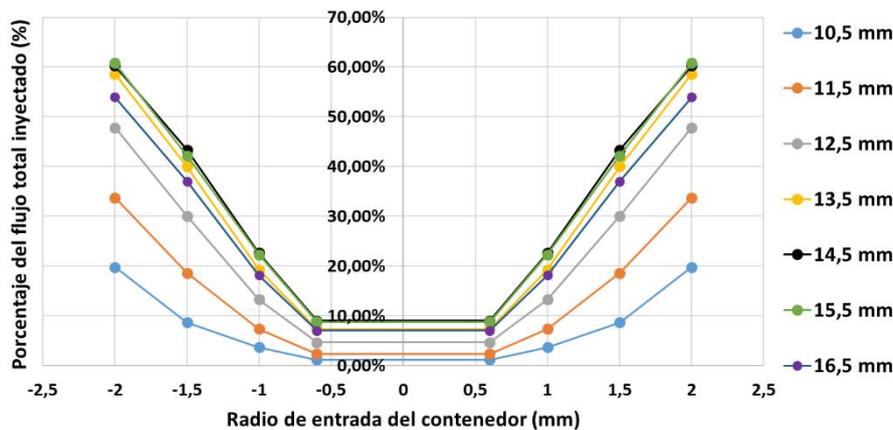


Figura III-22. Resultados de la distribución del polvo de la Inconel 718 a distintas distancias de la boquilla coaxial discreta de 4 vías y distintos flujos de polvo (círculo $11,3 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$; triángulo $18,4 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$).

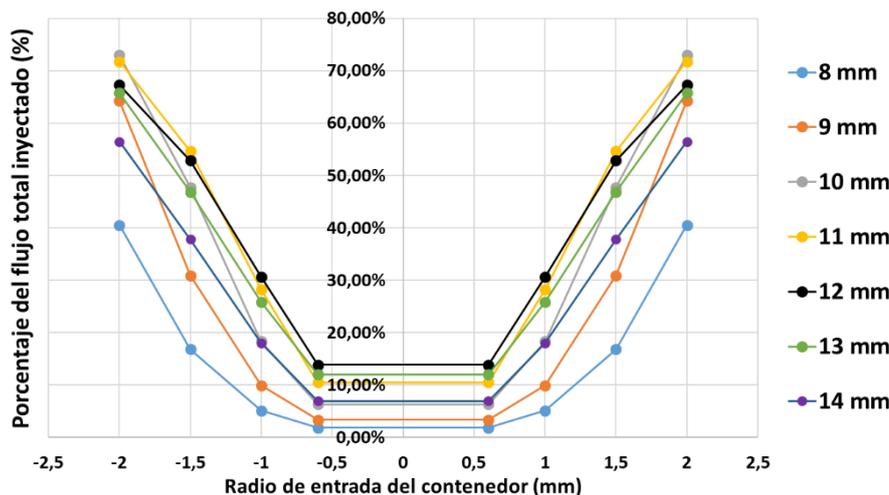
Los resultados han sido expresados por el porcentaje de polvo depositado respecto al total inyectado para cada diámetro de entrada del contenedor. El

resultado expresado de esta forma permite comparar flujos distintos pudiendo comprobarse si el resultado es dependiente del flujo másico de polvo utilizado. En todos los casos analizados se han obtenido variaciones mínimas en ambos flujos (Figura III-22) por lo que puede considerarse que en ambos flujos se obtienen prácticamente los mismos resultados.

Los resultados muestran más que un punto, un rango donde la concentración es máxima: entre 13,5 y 15,5 mm en el caso de la boquilla coaxial discreta (Figura III-23.a), un rango de entre 10 y 12 mm para la boquilla coaxial continua de 0,5 mm (Figura III-23.b), un rango de 12 a 14 mm para la boquilla coaxial continua de 0,75 mm (Figura III-24.a) y un rango de 13 a 15 mm para la boquilla coaxial continua de 1 mm (Figura III-24.b). Los resultados muestran que la distribución del flujo en el punto de máxima concentración tiene un diámetro superior a 4 mm.

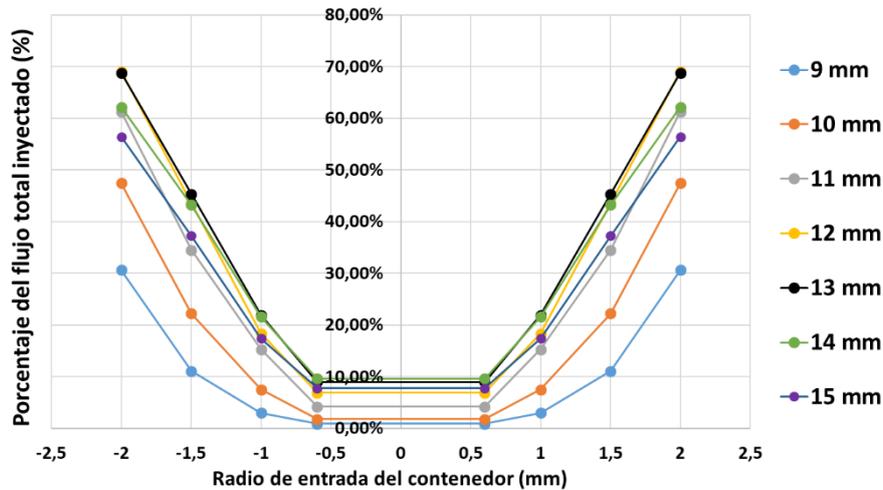


a)

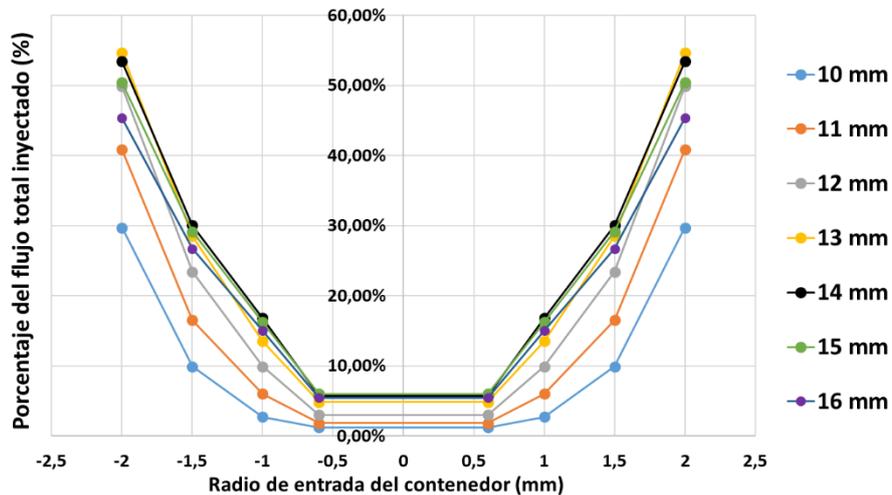


b)

Figura III-23. Resultados de la distribución del polvo de la Inconel 718 a distintas distancias de la boquilla: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua con ranura de 0,5 mm.



a)



b)

Figura III-24. Resultados de la distribución del polvo de la Inconel 718 a distintas distancias de la boquilla: a) Boquilla coaxial continua con ranura de 0,75 mm; b) Boquilla coaxial continua con ranura de 1 mm.

3.2.1 Comprobación del punto de máxima eficiencia de aporte.

Aunque en el subapartado anterior se ha obtenido el rango de máxima concentración del polvo, el objetivo de este subapartado es seleccionar el punto de máxima eficiencia durante el proceso y comprobar si está dentro del rango de máxima concentración de polvo. Se debe tener en cuenta que la eficiencia depende también de la anchura del baño fundido generado a esa distancia de trabajo. Esto depende de los tres parámetros que rigen la densidad de energía que recibe el sustrato (potencia del láser, avance y diámetro del spot) ya que,

como se comentó en el Capítulo II, la influencia del flujo de polvo en la anchura del baño fundido no parece relevante.

En estudios previos a esta tesis realizados con otros materiales para analizar el efecto de la potencia del láser y el tamaño de spot sobre el baño fundido, se comprobó que incrementar el diámetro del spot aumentando el valor de la ruleta focal genera un baño fundido más estable y uniforme con menor penetración y una anchura mayor a la obtenida con diámetros más pequeños si se realiza con los mismos parámetros. El material depositado con un mayor diámetro del spot también permite utilizar mayor potencia láser y presenta menor cantidad de defectos [Shi, 2018]. En esos estudios, se determinó la máxima potencia aplicable a cada valor de la ruleta focal (Tabla III-7) que fue la que generó humo, partículas y deflagraciones peligrosas para la integridad del equipo, además de daños en la lente protectora del cabezal láser (Figura III-25), a pesar de emplear el máximo caudal de gas de protección posible.

Tabla III-7. Potencias máximas recomendadas para cada valor de la ruleta focal.

Ruleta Focal	0	2	4	6	8	10
Potencia máxima (W)	1200	1200	1700	1700	2200	2700



Figura III-25. Cristal de protección dañado por proyecciones generadas durante el proceso de aporte.

En la Figura III-26.a se pueden ver algunos resultados de las secciones transversales de la dilución generada en el sustrato, así como los efectos que tiene en la penetración un exceso de densidad de energía en pruebas realizadas con sustrato de acero AISI 316L. Los resultados muestran que, con una potencia de 2200 W y un valor de la ruleta focal de 4, la penetración aumenta hasta formar el típico “Keyhole” de aplicaciones de corte láser. Sin embargo, con la ruleta al 10 (Figura III-26.b), el diámetro del spot aumenta y se pueden utilizar mayores potencias alcanzando mayores anchuras con menor penetración del sustrato y

sin dañar el equipo. Las dimensiones obtenidas en ambos casos pueden verse en la Figura III-27.

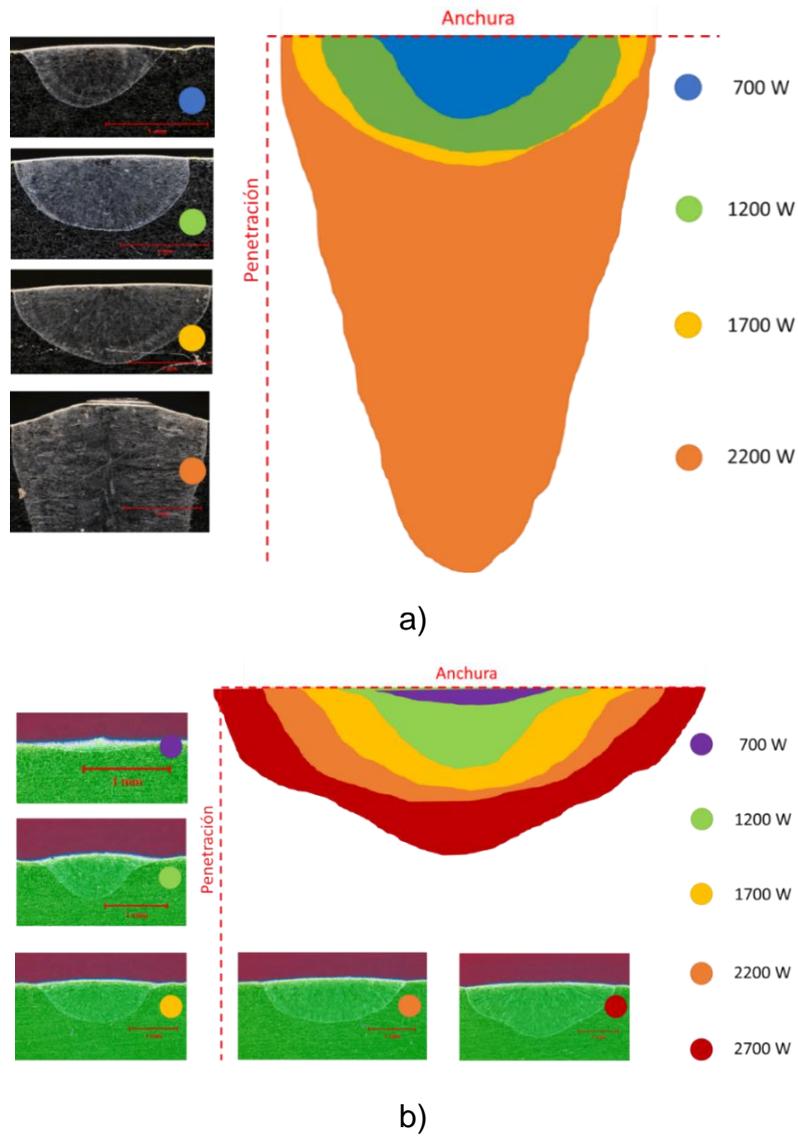


Figura III-26. Resultados de la penetración y anchura del baño fundido sobre sustrato AISI 316L. a) Ruleta focal al 4; b) Ruleta focal al 10.

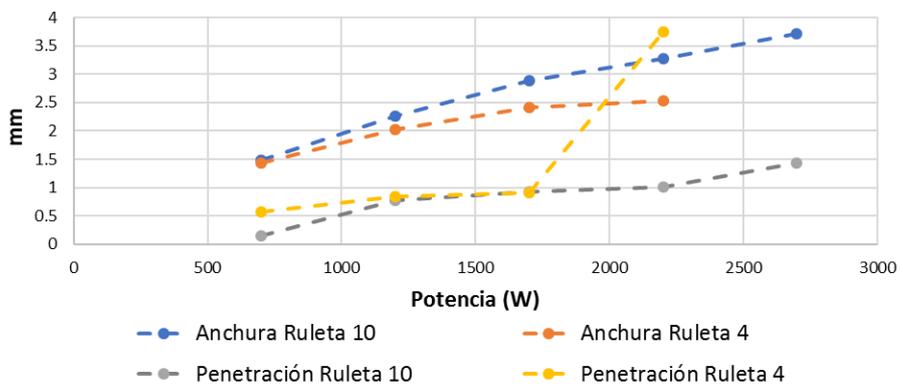


Figura III-27. Valores de la penetración y la anchura obtenida con la ruleta focal al 4 y al 10.

Por otro lado, aumentar el diámetro del spot láser (mediante el incremento del valor de la ruleta focal manteniendo los mismos parámetros de proceso) reduce la penetración reduciendo ligeramente la anchura del baño fundido (Figura III-28 y 29), por lo que si la penetración resulta excesiva una alternativa es aumentar el valor de la ruleta focal ya que reduce mínimamente la anchura del baño fundido.

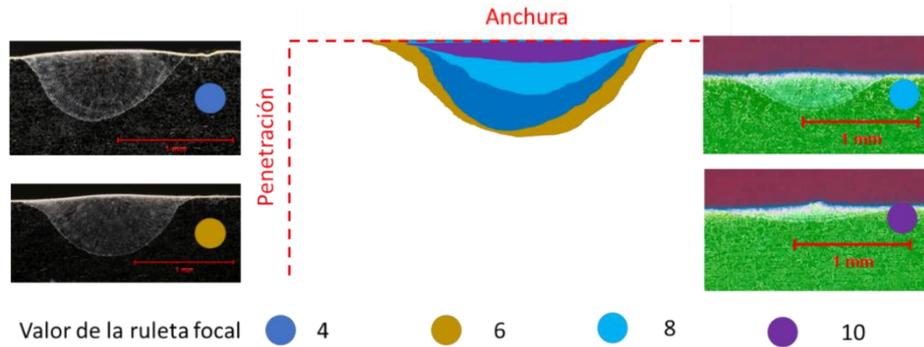


Figura III-28. Resultados a 700 W de potencia y distintos valores de la ruleta focal sobre sustrato AISI 316L. Comparación de las geometrías del baño fundido.

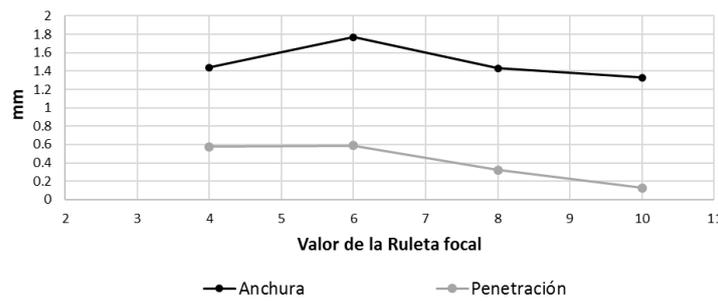


Figura III-29. Valores de la penetración y la anchura obtenida con distintos valores de la ruleta focal.

Esta tendencia ha sido validada con el sustrato empleado en esta tesis. Por tanto, el mayor baño fundido se obtendrá con el valor máximo (10) de la ruleta focal ya que aumenta el diámetro del spot láser a su máximo valor y permite emplear en el proceso la máxima potencia recomendada del equipo (2700 W). Los valores del avance y el flujo de polvo se han seleccionado según los resultados obtenidos en estudios previos con otros materiales [Ramiro, 2018-b] y han sido un avance de 500 mm·min⁻¹ y un flujo de polvo de 14,6 g·min⁻¹.

Para seleccionar el punto de máxima eficiencia se han aportado cordones a distintas distancias dentro del rango de mayor concentración de cada boquilla y se analizó la sección transversal de cada uno para obtener la eficiencia del material (η) aportado según la ecuación 3:

$$\eta = \frac{A \cdot \varphi_p \cdot v}{\dot{m}_p} \quad \text{Eq. 3}$$

Donde φ_p es la densidad del material ($8190 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), v es la velocidad de avance, A es el área de la sección transversal del cordón aportado y \dot{m}_p el flujo másico de polvo inyectado. Los resultados se muestran en la Figuras III-30 y la Figura III-31.

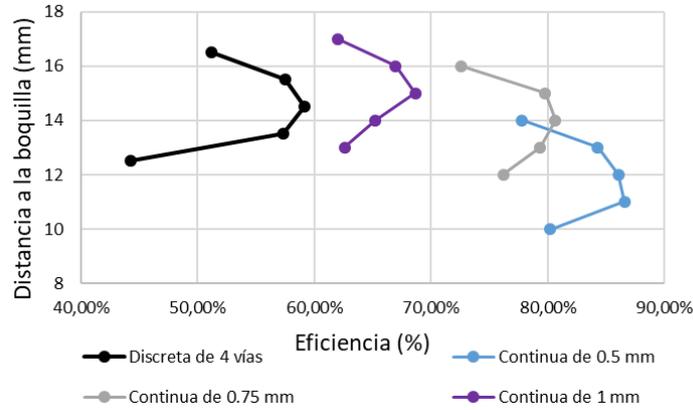


Figura III-30. Eficiencia del proceso según el tipo de boquilla a distintas distancias de trabajo.

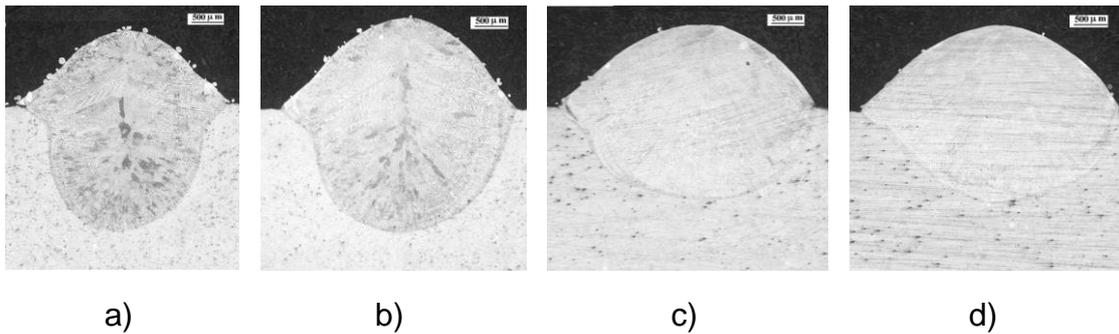


Figura III-31. Secciones transversales de los cordones aportados a distintas distancias con la boquilla discreta de 4 vías: a) 12,5 mm; b) 13,5 mm; c) 14,5 mm, d) 15,5 mm.

Los resultados no solo han mostrado la influencia de la distancia de aporte en la eficiencia del proceso, sino también la máxima eficiencia alcanzable con cada boquilla utilizada como se puede ver en la Figura III-30. También han mostrado la evolución de las características geométricas del cordón a cada distancia, tales como la altura, anchura, área, penetración y la dilución (Figura III-31).

Los cordones obtenidos no han presentado defectos (poros y grietas) y han servido para establecer la distancia de eficiencia máxima ya que la eficiencia es proporcional al área de la sección transversal del cordón. La anchura aumenta con la distancia debido a la divergencia del diámetro del spot láser mientras que la dilución y penetración disminuyen.

El criterio utilizado para la selección de la distancia de aporte ha sido el de la distancia de eficiencia máxima ya que inicialmente la dilución no parece ser un problema al ser el polvo y el sustrato del mismo material. Sin embargo, esta distancia es un criterio para revisar en casos en que dilución o penetración

supongan un problema, como puede ser aportar en sustratos con espesores pequeños o en sustratos de distinto material al del polvo inyectado. También hay que tener en cuenta que, a mayor distancia de aporte, la atmosfera protectora obtenida con el gas de protección pierde eficacia.

Tras establecer como criterio la eficiencia, se han desechado de los estudios experimentales las boquillas coaxiales continuas de menor eficiencia y se ha seleccionado la boquilla coaxial continua de 0,5 mm. También se ha decidido continuar con la discreta de 4 vías por ser la recomendada cuando hay que inclinar el cabezal láser, como es el caso en ciertas aplicaciones de recubrimiento debido a la configuración cinemática de la máquina. Las distancias de trabajo seleccionadas han sido de 11,5 y 14,5 mm para la boquilla coaxial continua y la coaxial discreta de 4 vías respectivamente.

3.2.2 Estudio de la distribución del flujo de polvo en el punto de máxima concentración.

Este estudio se ha realizado para determinar la distribución del flujo de polvo a la distancia de aporte seleccionada en el subapartado anterior. Se trata de un aspecto de alta importancia en el proceso, ya que, distribuciones no circulares generan diferencias en el material aportado según la dirección de avance [Artaza, 2019]. Para ello se ha vuelto a utilizar el mismo utillaje descrito en el apartado 3.2 pero de manera que se ha podido obtener un “mapa” tridimensional de la distribución mediante el peso del polvo obtenido en distintos puntos del plano XY. La distancia de separación entre puntos de medición ha sido de 0,8 mm y el flujo de polvo utilizado en ambas boquillas ha sido de $18 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$.

En este caso se ha empleado una boquilla con una sección de entrada de 0,8 mm para recoger el polvo inyectado durante 195 segundos en distintos puntos del plano XY siendo el punto de referencia el centro del punto de aporte (Figura III-32). Las cantidades de polvo pesadas en cada punto han servido para obtener una gráfica tridimensional proporcional a la distribución del polvo (Figura III-33).

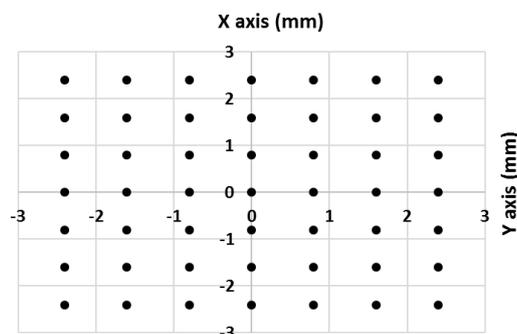


Figura III-32. Puntos sobre el plano XY a la distancia de aporte en los cuales se hicieron las mediciones para obtener la gráfica de la distribución del polvo.

Como era de esperar, la cantidad de polvo recogido con la boquilla coaxial continua de 0,5 mm ha mostrado una mayor concentración respecto a la obtenida con la boquilla discreta 4 vías. En ambos casos se ha presentado una ligera asimetría que fue mayor en el caso de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm. Esto seguramente es debido a que, al obtenerse mayores cantidades de polvo en las mediciones realizadas con esta boquilla, la asimetría ha sido más fácil de detectar. Sin embargo, la distribución ha sido bastante similar a una distribución circular en ambos casos y por tanto se puede suponer como tal. El diámetro del flujo de polvo a la distancia de mayor concentración a estado entre 4 y 5 mm en ambos casos.

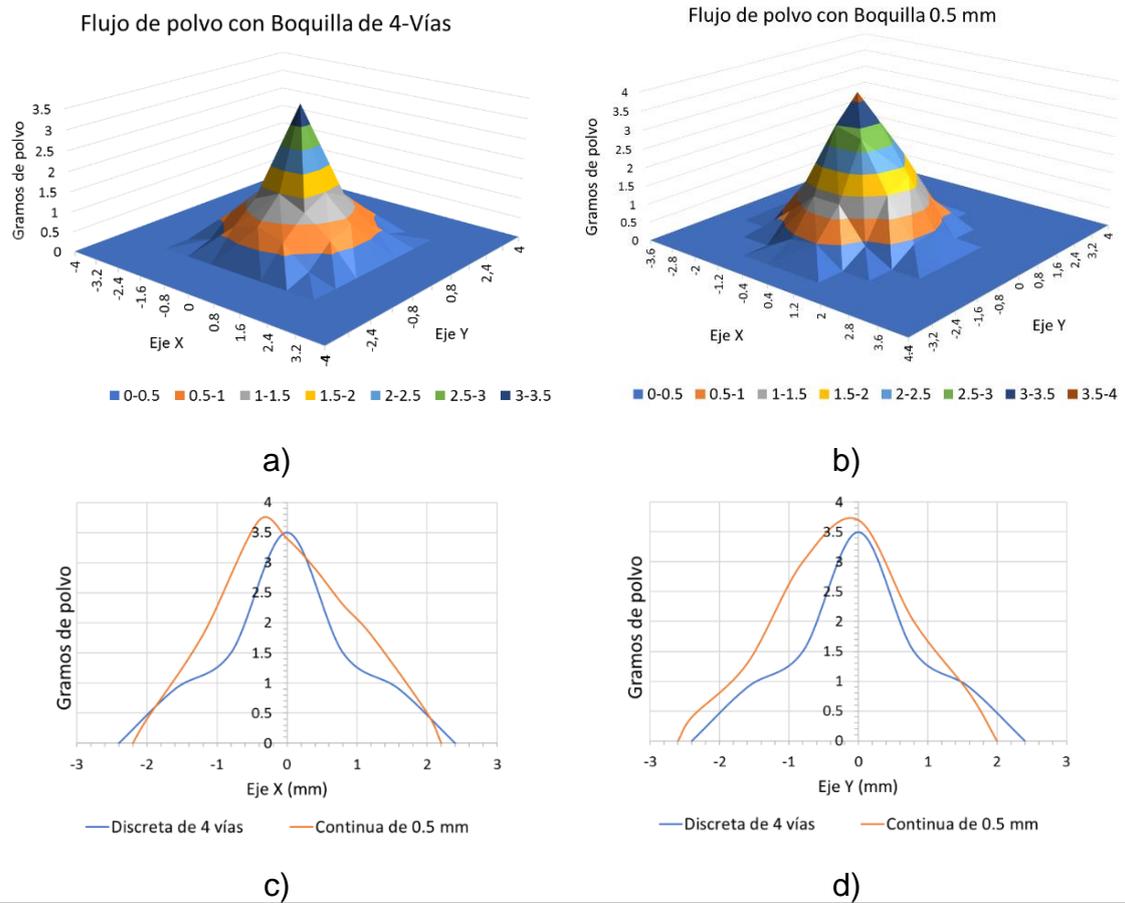


Figura III-33. Gráficas obtenidas de la distribución del polvo a la distancia de aporte: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías a 14,5 mm de distancia; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm a 11,5 mm de distancia; c) Proyección en el eje X de la distribución en ambas boquillas; d) Proyección en el eje Y de la distribución en ambas boquillas.

3.3 Evaluación de las condiciones de aporte al inicio y al final del proceso de aporte

El objetivo de este estudio es determinar el tiempo necesario para obtener unas condiciones estables de la potencia del láser, tanto al inicio como al final de un proceso de aporte.

Para ello, se han adquirido las señales de velocidad de avance, posición del cabezal y potencia del láser a una frecuencia de 125 Hz. durante la ejecución de un cordón simple. Las potencias empleadas para este análisis han sido 1900, 2200 y 2500 W, y los avances en un rango de 300 a 1300 mm·min⁻¹ en intervalos de 200 mm·min⁻¹.

Los resultados han mostrado que la potencia presenta una rampa de inicio hasta alcanzar el valor nominal programado, tras lo cual se mantiene constante hasta el final del proceso de aporte. Tras terminar el proceso de aporte también hay una rampa final de la potencia ya que hay un tiempo en que el generador láser continúa funcionando a baja potencia (Figura III-34).

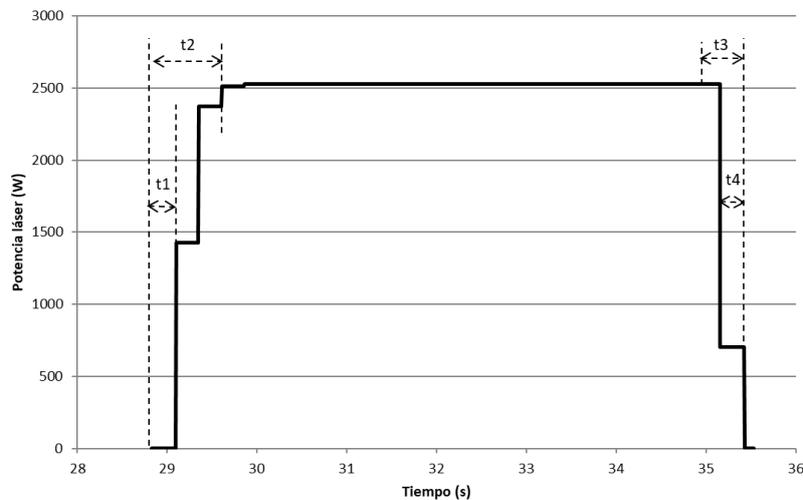


Figura III-34. Datos adquiridos a una potencia nominal de 2500 W.

Este hecho conlleva que se tenga que distinguir 4 tiempos en el proceso fuera del rango de potencia estable:

- t1: El tiempo desde que se inicia el avance ($v>0$) hasta que se genera el haz láser ($P>0$).
- t2: El tiempo desde que se inicia el avance ($v>0$) hasta que el haz láser alcanza el valor nominal de potencia.
- t3: El tiempo desde que se detiene el cabezal ($v=0$) hasta se detiene el haz láser ($P=0$)
- t4: El tiempo en el que el cabezal láser descarga el haz residual que queda en el generador.

Analizando los datos adquiridos durante el proceso de aporte se ha determinado que estos tiempos están dentro del rango mostrado en la Tabla III-8.

Tabla III-8. Rango de tiempo en segundos en cada parte.

t1	t2	t3	t4
0,264-0,275	0,776-1,051	0,368-0,544	0,248-0,64

Al efecto que tiene la potencia en el inicio y final del proceso, se ha de sumar el efecto del avance. El proceso de aporte se inicia con el cabezal láser en reposo y decelera hasta alcanzar nuevamente el reposo al final del proceso antes de detener el haz. Esto es una condición inherente a la máquina. Es por esto por lo que el material aportado presenta una parte inicial afectada por la aceleración y la rampa de potencia y otra final afectada por la deceleración del avance y el retraso en el apagado del haz láser. Como consecuencia, la parte inicial del cordón presenta una zona aportada bajo unas condiciones de menor densidad de energía y la zona final del cordón presenta una zona aportada bajo unas condiciones de mayor densidad de energía. Sin embargo, el tiempo de aceleración y deceleración puede considerarse despreciable en el rango de velocidades que se han estudiado ya que la cinemática de esta máquina permite alcanzar aceleraciones de $266 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$.

La monitorización de la posición, velocidad y potencia durante el proceso de aporte ha permitido establecer la distancia recorrida fuera de la zona de condiciones de avance y potencia estables siendo la parte inicial del material aportado la que presenta mayor distancia afectada (Figura III-35).

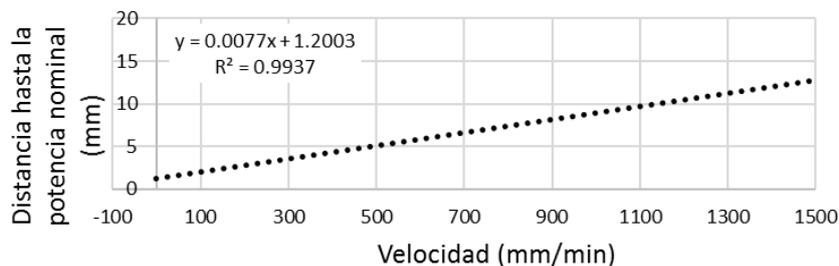


Figura III-35. Relación lineal de la distancia inicial recorrida hasta obtener la potencia y velocidades nominales.

La Figura III-35 muestra una relación lineal de la velocidad con la distancia recorrida en el proceso de aporte hasta obtener una potencia y velocidad constantes. Esto permite calcular que parte inicial del cordón se debe excluir de estudio en el proceso de caracterización. Aunque la parte final del cordón que resulta afectada es menor que la inicial, y para facilitar el proceso de corte y preparación de muestras, se ha establecido que se excluyan de estudio la misma distancia en ambos lados del cordón y que además sea siempre la misma distancia. Por lo que se ha establecido excluir la máxima distancia alcanzada a $1300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y que corresponde con una distancia de $11,2 \text{ mm}$ en ambos extremos.

4 Estudio experimental del proceso de aporte

4.1 Caracterización del proceso de aporte

Tras definir la distancia de trabajo, el caudal de gas de arrastre y protección, el diámetro del haz láser y las boquillas del cabezal láser, se ha definido una ventana de parámetros principales del proceso (potencia, avance y flujo de polvo) con el fin de caracterizar el proceso y obtener las relaciones entre estos parámetros y las características principales del material aportado. Para ello se han aportado cordones individuales combinando diferentes valores de dichos parámetros y se han analizado tanto la geometría como la estructura de 4 secciones transversales de cada cordón aportado. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla III-9. Los resultados han permitido obtener las ecuaciones del proceso, la desviación típica y seleccionar los parámetros óptimos de trabajo. La longitud de los cordones ha sido de 60 mm (Figura III-36) y la distancia inicial y final desechada en cada cordón dentro de este estudio ha sido de 11,21 mm, tal y como se ha comentado en el apartado anterior.

Tabla III-9. Parámetros de la caracterización.

Parámetros	Valores
Tipo de Boquilla coaxial Discreta	Discreta de 4 vías
Tipo de Boquilla coaxial Continua	Ranura de 0,50 mm
Distancia focal al sustrato con la boquilla discreta (mm)	14,5
Distancia focal al sustrato con la boquilla continua (mm)	11,5
Valor de la ruleta focal	10
Flujo másico de polvo ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)	11-14-18-21
Potencia (W)	2500-2200-1900
Avance ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	300-500-700-900-1100-1300



Figura III-36. Cordones aportados con la boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

Las ecuaciones de cada característica geométrica del cordón individual han sido obtenidas de la siguiente manera:

1. Obteniendo el valor medio de las 4 secciones transversales.

2. Relacionando el valor medio de cada característica geométrica con la potencia y el avance para cada flujo másico de polvo mediante regresión.
3. Relacionando posteriormente las ecuaciones de cada flujo másico de polvo entre si también mediante regresión.

Para que esto sea posible, las ecuaciones para cada flujo de polvo deben ser las mismas, pero con distintos coeficientes. Como ejemplo, en el caso de la altura del cordón obtenida utilizando la boquilla coaxial continua, la altura ha mostrado depender exclusivamente del avance para cada flujo de polvo utilizado (Figura III-37), siendo la misma ecuación para todos los flujos (Figura III-38) aunque con distintos coeficientes que pueden relacionarse por regresión (Figura III-39).

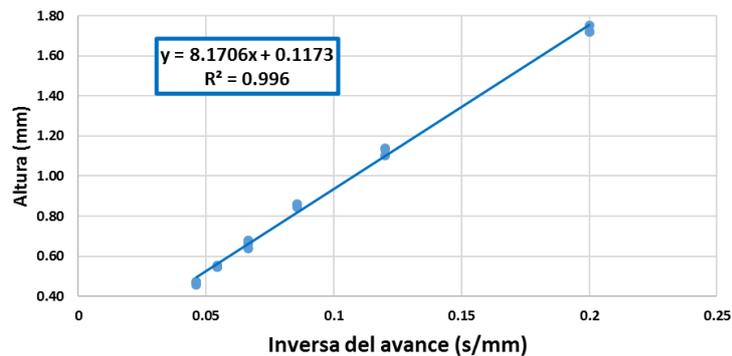


Figura III-37. Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. Relación de la altura con la inversa del avance para $14 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ y potencias de 2500, 2200 y 1900 W.

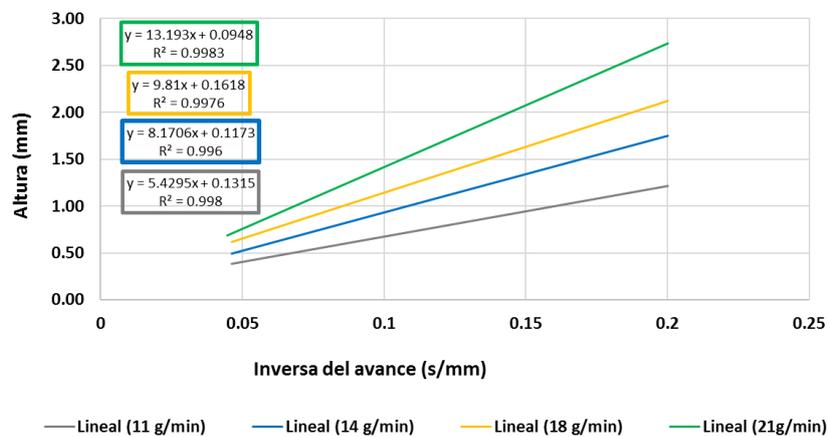


Figura III-38. Boquilla coaxial continua de 0,5 mm. Ecuación de la altura en función del flujo de polvo.

Una vez se obtienen las ecuaciones, se ha calculado la desviación de los resultados de estas con la media obtenida de las 4 secciones transversales. También se ha calculado la desviación entre las secciones transversales y la media por lo que se ha podido definir dos tipos de error, uno inherente al proceso y otro a las ecuaciones como se puede ver en la Tabla III-10.

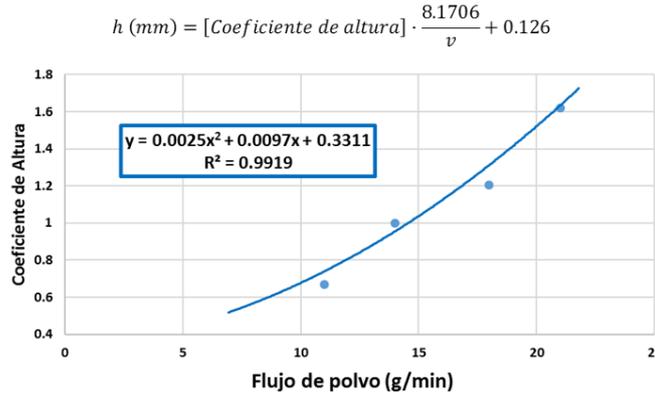


Figura III-39. Coeficiente del flujo de polvo para la ecuación de altura con la boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

Tabla III-10. Desviaciones de las ecuaciones y del proceso para las dos boquillas caracterizadas.

	Boquilla de 4 vías		Boquilla continua de 0,5 mm	
	Error del modelo, σ	Variabilidad del proceso, σ	Error del modelo, σ	Variabilidad del proceso, σ
h (μm)	31	54	33	28
w (μm)	82	86	108	91
A (μm^2)	79	168	55	85
b (μm)	67	89	81	72

En la Tabla III-11 se muestran las ecuaciones obtenidas para la altura en ambas boquillas. Las Figuras III-40 y III-41 muestran los gráficos de la altura en función de los parámetros principales del proceso dentro del rango estudiado.

Tabla III-11. Ecuaciones de la altura del cordón individual: A_h, B_h, C_h son ecuaciones lineales de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico de polvo. A_h' es una ecuación de segundo grado de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm que dependen del flujo másico de polvo. Unidades: $W, \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ y $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$.

Boquilla discreta de 4 vías		Boquilla coaxial continua de 0,5 mm	
$h \text{ (mm)} = \frac{A_h \cdot P}{v^2} + \frac{B_h \cdot \sqrt{P}}{v} + C_h$	(Eq. 4)	$h \text{ (mm)} = \frac{A_h'}{v} + 0.126$	
$A_h = -2.4515 \cdot \dot{m}_p + 18.029$	(Eq. 6)	$A_h' = 1.2256 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 4.7553 \cdot \dot{m}_p + 162.3171$	(Eq. 5)
$B_h = 0.8638 \cdot \dot{m}_p - 0.322$	(Eq. 8)		
$C_h = -0.0046 \cdot \dot{m}_p + 0.0431$	(Eq. 9)		(Eq. 7)

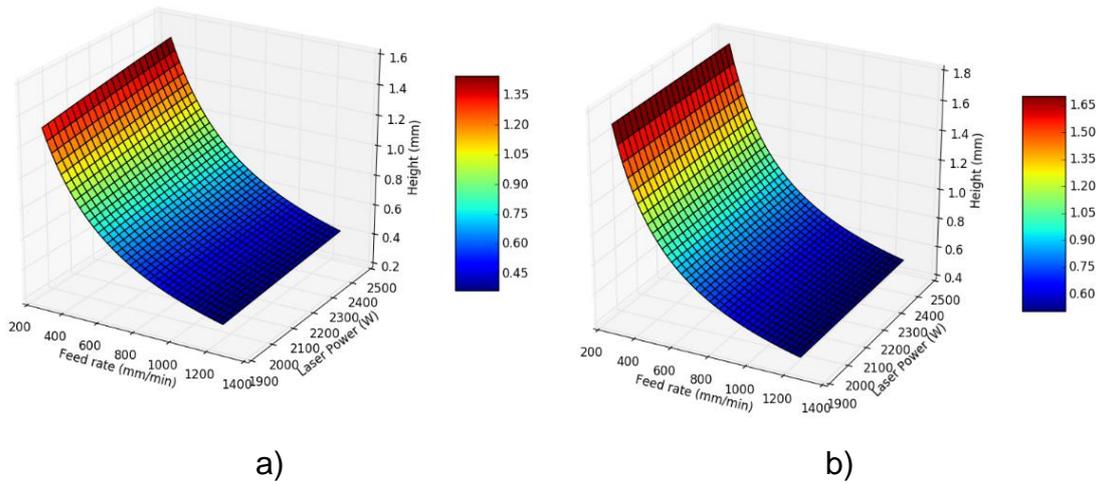


Figura III-40. Altura del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

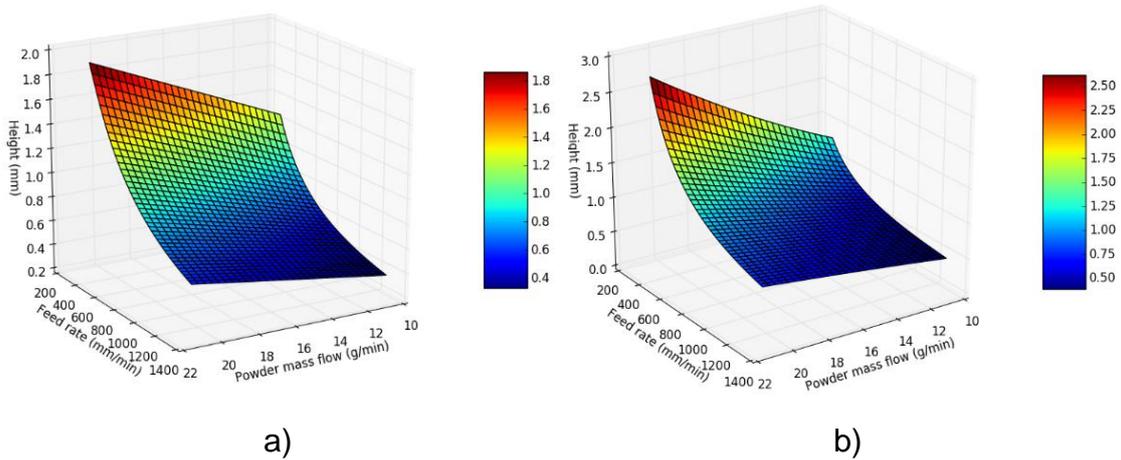


Figura III-41. Altura del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

En la Tabla III-12 se muestran las ecuaciones obtenidas para la anchura en ambas boquillas. Las Figuras III-42 y III-43 muestran los gráficos de la anchura en función de los parámetros principales del proceso dentro del rango estudiado.

Tabla III-12. Ecuaciones de la anchura del cordón individual: A_w es una ecuación de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico de polvo. A_w' , B_w' son ecuaciones de segundo grado de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm que dependen del flujo másico de polvo. Unidades: W (KW con la coaxial continua), $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$.

Boquilla discreta de 4 vías	Boquilla coaxial continua de 0,5 mm
$w \text{ (mm)} = \frac{A_w \cdot e^{(0.0022 \cdot P)}}{v} + 2.632$ <p>(eq. 10)</p>	$w \text{ (mm)} = \frac{A_w' \cdot P^6}{v^2} + \frac{B_w' \cdot P^3}{v} + 2.612$ <p>(eq. 11)</p>
$A_w = -0.0135 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 0.47 \cdot \dot{m}_p - 2.8689$ <p>(eq. 12)</p>	$A_w' = -2.2923 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 116.29 \cdot \dot{m}_p - 1672$ <p>(eq. 13)</p>
	$B_w' = 0.3868 \cdot (\dot{m}_p)^2 - 16.933 \cdot \dot{m}_p + 219.51$ <p>(eq. 14)</p>

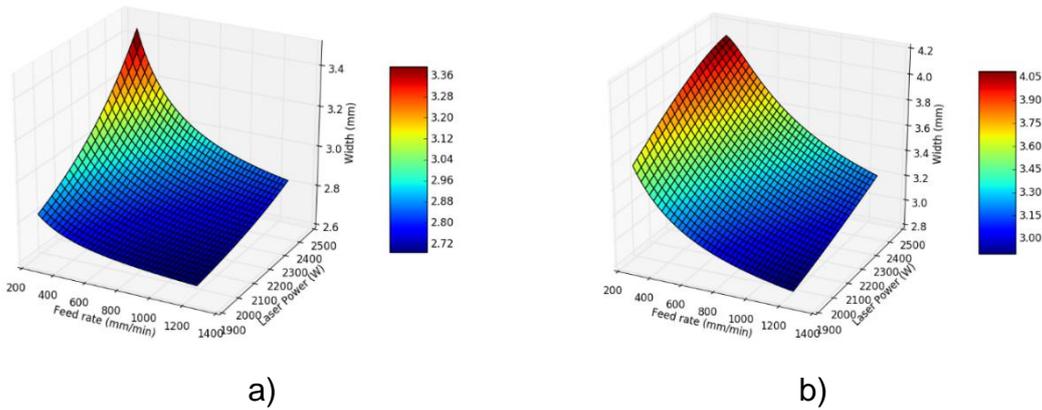


Figura III-42. Anchura del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

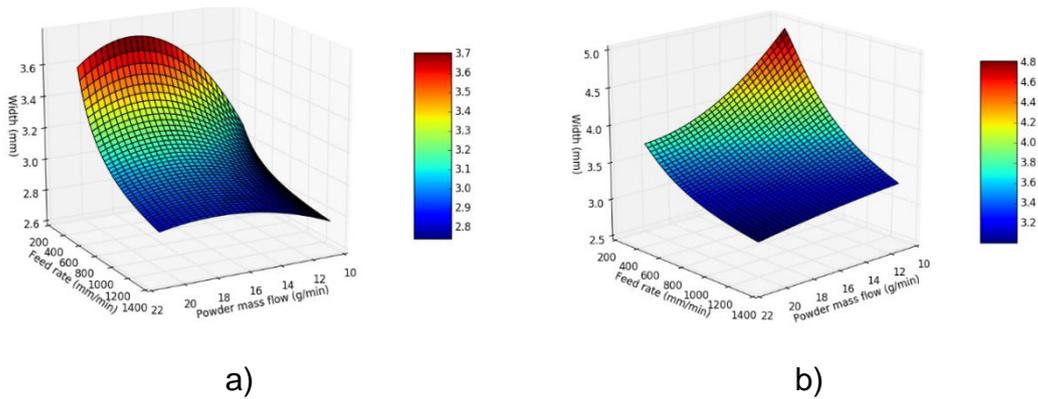


Figura III-43. Anchura del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

En la Tabla III-13 se muestran las ecuaciones obtenidas para el área en ambas boquillas. Las Figuras III-44 y III-45 muestran los gráficos del área en función de los parámetros principales del proceso dentro del rango estudiado.

Tabla III-13. Ecuaciones del área del cordón individual: A_A y B_A son ecuaciones de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico de polvo. A_A' , B_A' son ecuaciones de lineales de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm que dependen del flujo másico de polvo. Unidades: W , $mm \cdot min^{-1}$ y $g \cdot min^{-1}$.

Boquilla discreta de 4 vías	Boquilla coaxial continua de 0,5 mm
$A (mm^2) = \frac{A_A \cdot (P - 526.34)}{v} - B_A \cdot (P - 1632)$ <p>(Eq. 15)</p>	$A (mm^2) = \frac{A_A' \cdot P^{0.3}}{v} + B_A'$ <p>(Eq. 16)</p>
$A_A = -0.0031 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 0.1431 \cdot \dot{m}_p - 0.8123$ <p>(Eq. 17)</p>	$A_A' = 10.665 \cdot \dot{m}_p + 4.1649$ <p>(Eq. 18)</p>
$B_A = -0.00001 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 0.00037 \cdot \dot{m}_p - 0.00286$ <p>(Eq. 19)</p>	$B_A' = -0.0236 \cdot \dot{m}_p + 0.0408$ <p>(Eq. 20)</p>

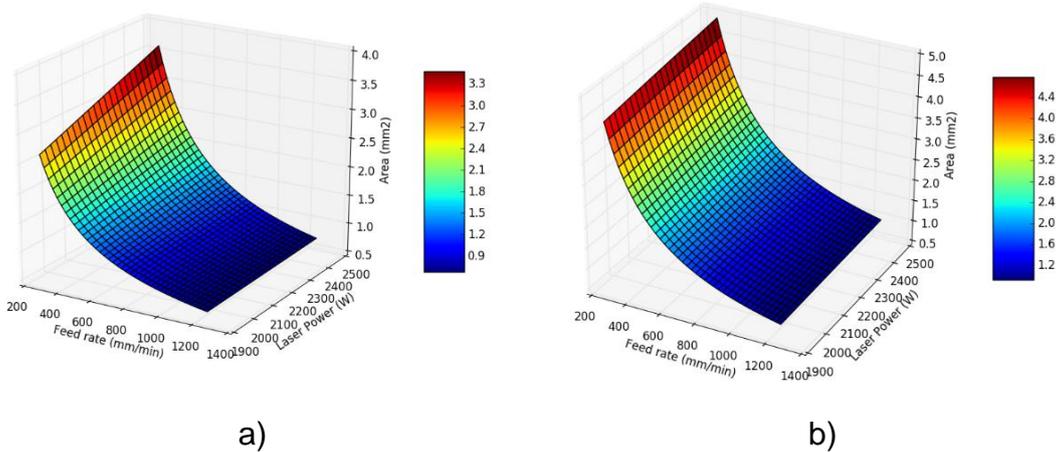


Figura III-44. Área del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

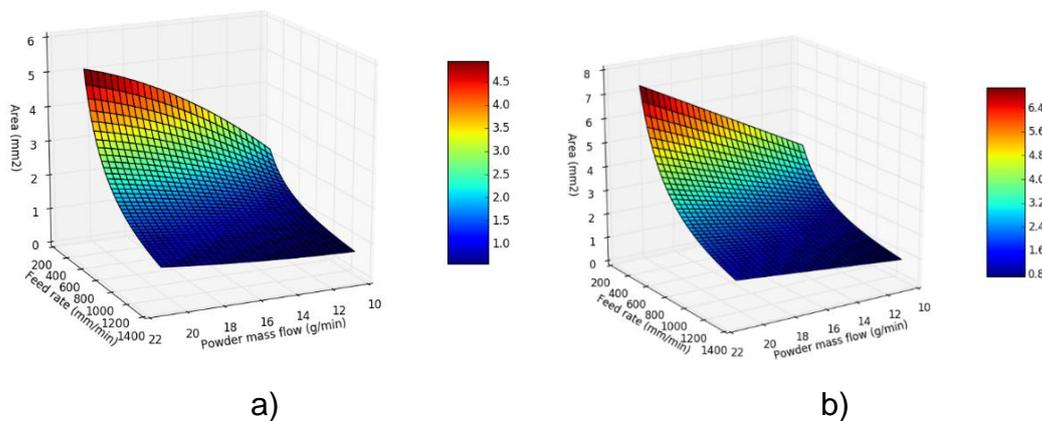


Figura III-45. Gráfica del área del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

En la Tabla III-14 se muestran las ecuaciones obtenidas para la penetración en ambas boquillas. Las Figuras III-46 y III-47 muestran los gráficos de la penetración en función de los parámetros principales del proceso dentro del rango estudiado.

Tabla III-14. Ecuaciones de la penetración del cordón individual: A_p y B_p son ecuaciones de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen del flujo másico de polvo. C_p y D_p son ecuaciones de segundo grado de la boquilla discreta de 4 vías que dependen de la potencia. A_p' , B_p' son ecuaciones de segundo grado de la boquilla coaxial continua de 0.5 mm que dependen del flujo másico de polvo. C_p' , D_p' son ecuaciones de lineales de la boquilla coaxial continua de 0.5 mm que dependen de la potencia. Unidades: W, mm·min⁻¹ and g·min⁻¹ (Boquilla coaxial continua); KW, mm·s⁻¹ y g·s⁻¹ (Boquilla discreta de 4 vías).

Boquilla discreta de 4 vías	Boquilla coaxial continua de 0,5 mm
$p \text{ (mm)} = A_p \cdot C_p \cdot v + B_p \cdot D_p$ <p style="text-align: center;">(Eq. 21)</p>	$p \text{ (mm)} = A_p' \cdot C_p' \cdot \ln\left(\frac{60}{v}\right) + B_p' \cdot D_p'$ <p style="text-align: center;">(Eq. 22)</p>
$A_p = -11.065 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 6.302 \cdot \dot{m}_p + 0.1078$ <p style="text-align: center;">(Eq. 23)</p>	$A_p' = -0.0222 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 0.6391 \cdot \dot{m}_p - 3.596$ <p style="text-align: center;">(Eq. 24)</p>
$B_p = -4.1886 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 1.894 \cdot \dot{m}_p + 0.8176$ <p style="text-align: center;">(Eq. 25)</p>	$B_p' = -0.0161 \cdot (\dot{m}_p)^2 + 0.4678 \cdot \dot{m}_p - 2.383$ <p style="text-align: center;">(Eq. 26)</p>
$C_p = 0.0106 \cdot (P)^2 - 0.0609 \cdot P + 0.0323$ <p style="text-align: center;">(Eq. 27)</p>	$C_p' = 0.0002 \cdot P + 0.2668$ <p style="text-align: center;">(Eq. 28)</p>
$D_p = -0.2778 \cdot (P)^2 + 1.8937 \cdot P - 0.6502$ <p style="text-align: center;">(Eq. 29)</p>	$D_p' = 0.0008 \cdot P + 0.8861$ <p style="text-align: center;">(Eq. 30)</p>

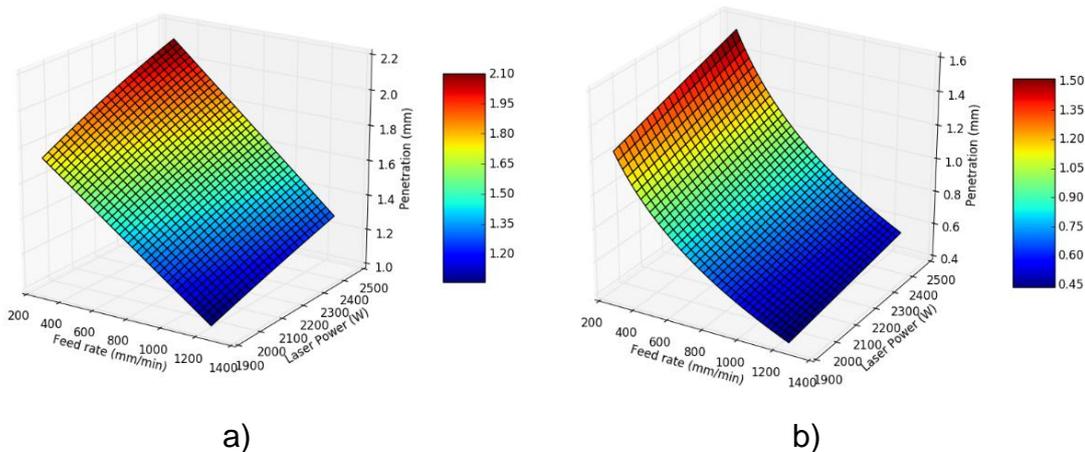


Figura III-46. Penetración del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de 14 g·min⁻¹: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

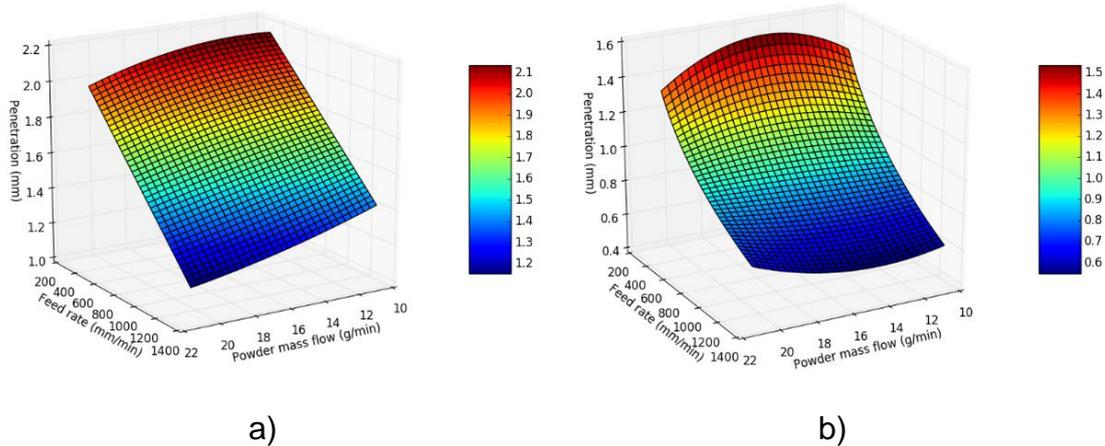


Figura III-47. Penetración del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

La Tabla III-15 clasifica la influencia de cada parámetro en cada característica geométrica del cordón dentro del rango estudiado. Aunque la potencia en principio no parece influir tanto como el flujo másico de polvo o el avance en la mayoría de los casos, sí que tiene un papel fundamental en la aparición de poros en el material aportado. Así pues, ha aparecido poros en los cordones depositados a 1900 W con la boquilla coaxial discreta de 4 vías y en algún cordón aportado con la boquilla coaxial continua a esa misma potencia. En líneas generales los resultados no contradicen los resultados de otros trabajos revisados en el estado del arte.

Tabla III-15. Valoración de la influencia de cada parámetro principal en las características geométricas del cordón individual aportado.

Característica	Influencia de la potencia	Influencia del avance	Influencia del flujo de polvo
h (mm)	Baja a nula	Alta	Alta
w (mm)	Alta a Media	Alta	Media a baja
A (mm²)	Media a baja	Alta	Alta
p (mm)	Media a baja	Alta	Baja

Incluyendo las ecuaciones del área del cordón en la ecuación 3 (subapartado 3.2.1 de este capítulo) se pueden obtener las gráficas de la eficiencia en función de los parámetros principales. Otras características interesantes para analizar son la dilución geométrica (Eq. 31), tasa de aporte de material (MDR, Eq. 32) y la productividad (entendida como la superficie recubierta por unidad de tiempo, Eq. 33).

$$\text{dilución (\%)} = \frac{p}{(h + p)} \tag{Eq. 31}$$

$$\text{MDR (Kg} \cdot \text{h}^{-1}\text{)} = \eta \cdot \dot{m}_p \tag{Eq. 32}$$

$$\text{Productividad (mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}\text{)} = w \cdot v \tag{Eq. 33}$$

Las siguientes figuras muestran la dilución en función de la velocidad de avance, la potencia del láser y el flujo de polvo para los dos tipos de boquillas.

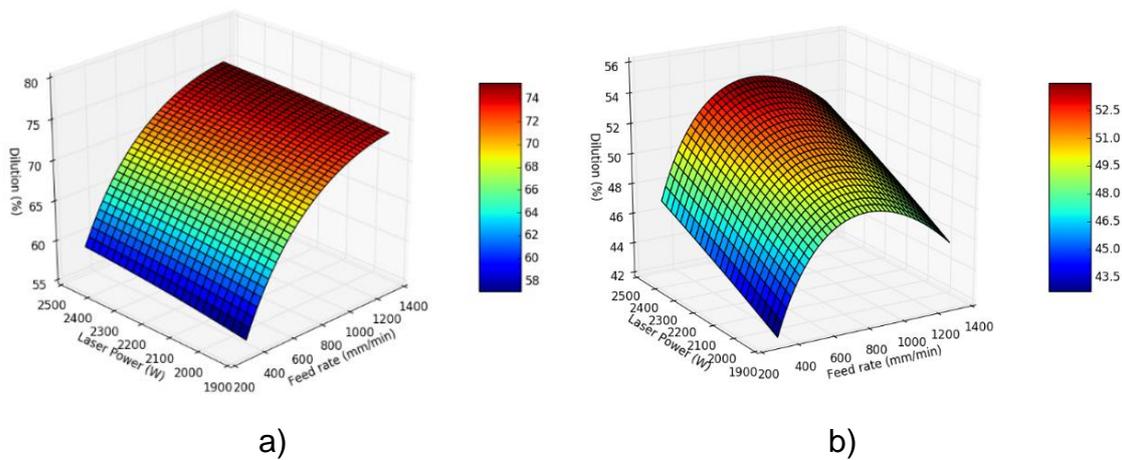


Figura III-48. Dilución del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de 14 g·min⁻¹: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

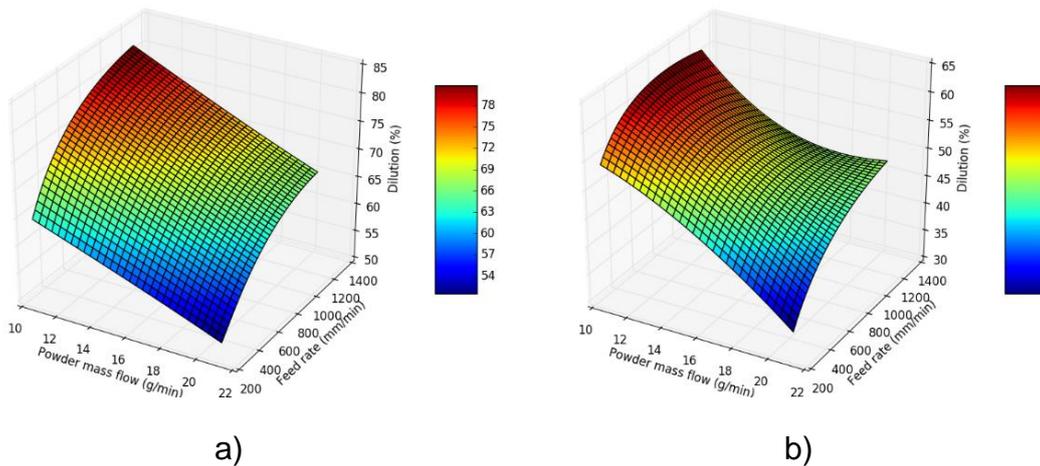


Figura III-49. Dilución del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

Como se puede ver en las Figuras III-48 y 49, la dilución es menor en la boquilla coaxial continua de 0,5 mm. En ambas boquillas la dilución mínima se alcanza con la menor velocidad de avance, aunque aumente la densidad de energía en

el baño fundido. Esto ocurre simplemente porque se deposita mayor cantidad de material alcanzando una mayor altura y no porque realmente se reduzca el área de la zona de dilución del sustrato. A mayor flujo de polvo también se reduce la dilución, pero solo porque aumenta la cantidad de material aportado ya que la penetración apenas varía (Figura III-47). Por ello, conviene recordar que aumentar la distancia de aporte reduce tanto la dilución como la penetración si ambas suponen un problema, aunque conlleva perder eficiencia en el material aportado durante el proceso.

Las siguientes figuras muestran la eficiencia del polvo en función de la velocidad de avance, la potencia del láser y el flujo de polvo para los dos tipos de boquillas.

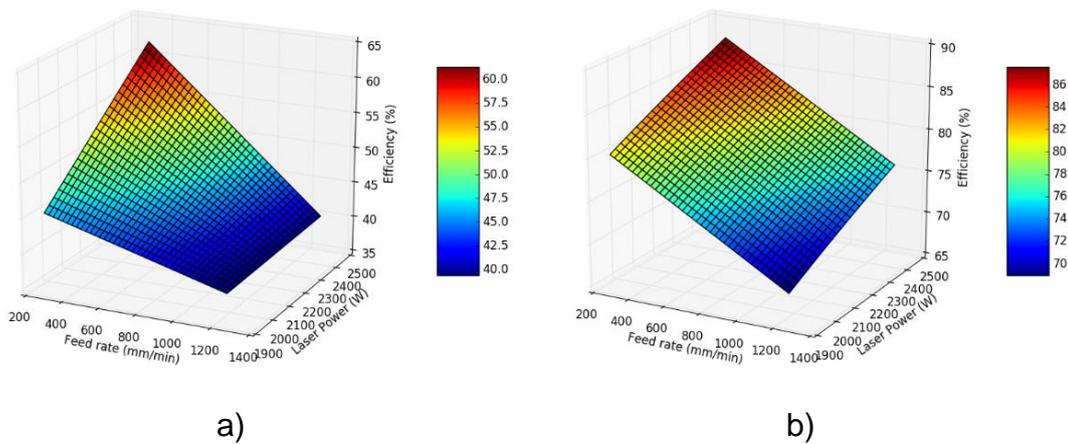


Figura III-50. Eficiencia del polvo según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

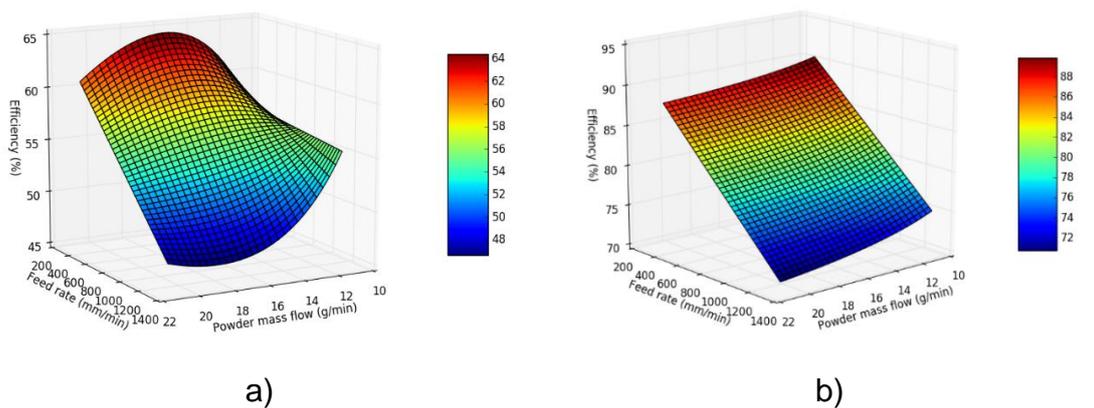


Figura III-51. Eficiencia del polvo según la ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

Como se puede ver en las Figuras III-50 y 51, la eficiencia es bastante mayor en la boquilla coaxial continua de 0,5 mm siendo más determinante la elección de la boquilla que los parámetros utilizados para obtener la máxima eficiencia. A

menor velocidad y mayor potencia, se obtiene mayor eficiencia debido a que a mayor tamaño de baño fundido mayor cantidad de polvo puede quedar depositado. El flujo de polvo utilizado apenas influye en la boquilla coaxial continua, aunque en la boquilla discreta muestra una ligera influencia a velocidades menores de $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ mientras que a velocidades mayores la eficiencia aumenta sensiblemente con un menor flujo de polvo. En la boquilla coaxial discreta y con un flujo de $11 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ la eficiencia muestra poca variación con el avance pudiéndose considerar constante.

Esta anomalía en la eficiencia de la boquilla discreta de 4 vías es debida a que a menor flujo de polvo la formación del baño fundido es más rápida siendo más efectiva. El hecho de que no aumente la eficiencia con un flujo de $11 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ al reducir el avance es debido a que, aunque inicialmente es el baño fundido en el sustrato el que “atrapa” el polvo, a medida que se aporta material este aumenta en volumen. Esto aumenta tridimensionalmente la superficie que puede atrapar el polvo inyectado con la boquilla discreta pero cuanto menor es el flujo, menor es la superficie del volumen del baño fundido en el que se inyecta el polvo. En el caso de la boquilla continua esto no ocurre debido a que concentra de forma mucho más efectiva el flujo como se ha visto en el subapartado 3.2.2 de este capítulo.

Las siguientes figuras muestran la tasa de aporte MDR en función de la velocidad de avance, la potencia del láser y el flujo de polvo para los dos tipos de boquillas.

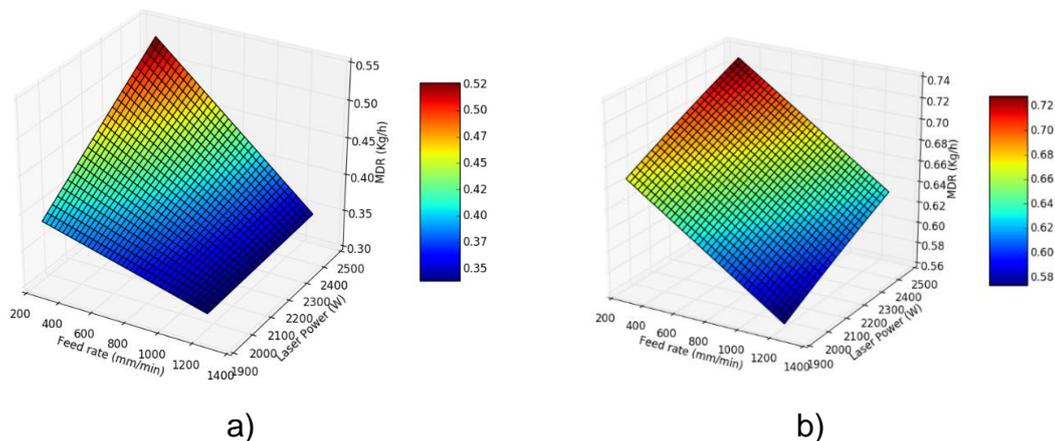


Figura III-52. MDR según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

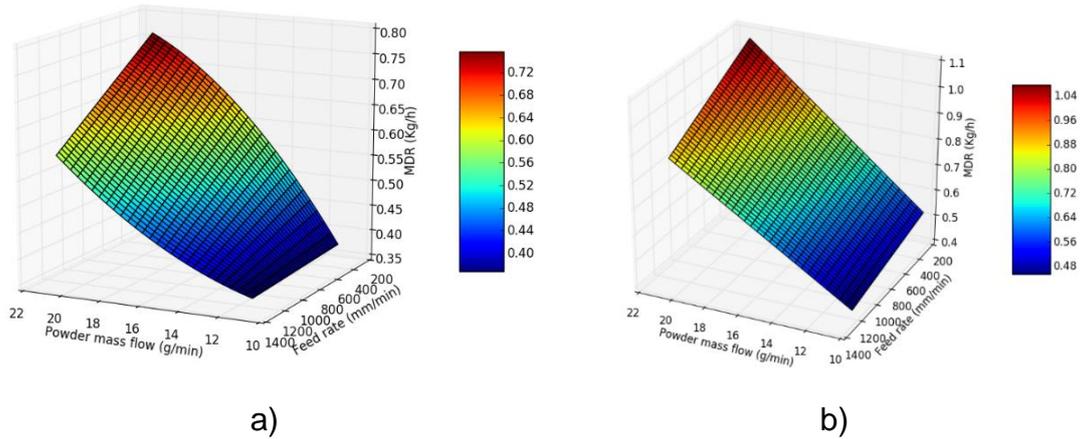


Figura III-53. MDR según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

Como se puede ver en las Figuras III-52 y 53, el MDR presenta la misma tendencia con respecto a la potencia y el avance que la eficiencia, aunque, lógicamente, presenta una mayor dependencia del flujo de polvo. A menor flujo de polvo menor efecto tiene el avance en el MDR. Igual que ocurre con la eficiencia, la boquilla coaxial continua de 0,5 mm presenta mayores valores.

Las siguientes figuras muestran la productividad en función de la velocidad de avance, la potencia del láser y el flujo de polvo para los dos tipos de boquillas.

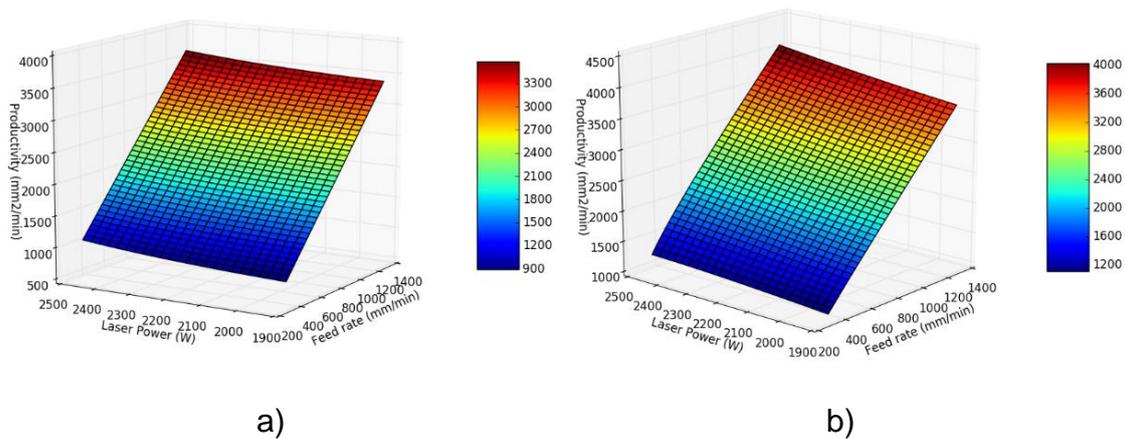


Figura III-54. Productividad del cordón depositado según las ecuaciones con un flujo de polvo de $14 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

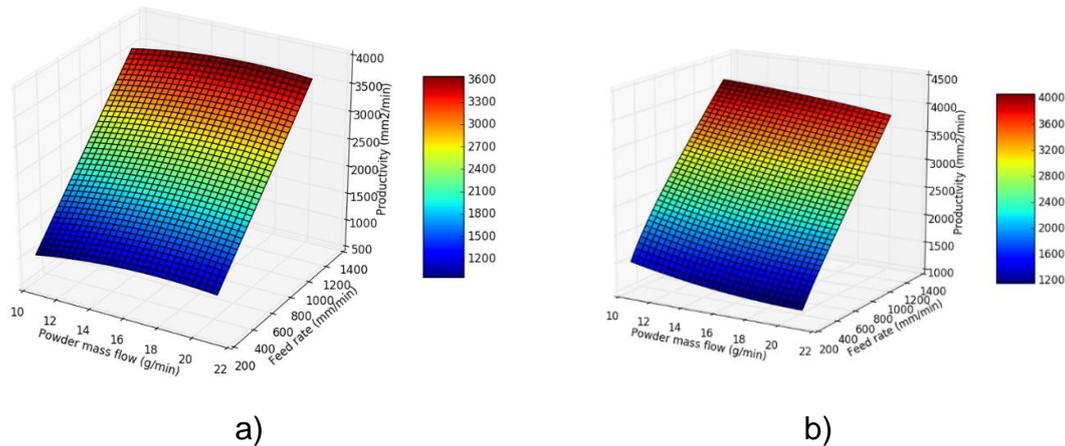


Figura III-55. Productividad del cordón depositado según las ecuaciones con una potencia de 2500 W: a) Boquilla coaxial discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0,5 mm.

En cuanto a la productividad, entendida como la superficie sobre la que se aporta material, el parámetro de mayor influencia es sin duda el avance como se puede ver en las Figuras III-54 y III-55. Hay que tener en cuenta que en el caso del cordón solapado la superficie aportada depende también del porcentaje de solapamiento por lo que la productividad real en ese caso será la mostrada en las Figuras III-54 y III-55 multiplicada por el porcentaje de la anchura recubierta por pasada respecto al cordón individual. Al igual que ocurre en lo demás casos, los mejores resultados se obtienen con la boquilla coaxial continua.

La Tabla III-16 clasifica la influencia de cada parámetro en cada característica analizada del cordón individual dentro del rango estudiado. En todos los casos los mejores valores son alcanzados por la boquilla coaxial continua de 0.5 mm aportando verticalmente, siendo la elección de la boquilla más importante que la selección de los parámetros de trabajo. Por tanto, en esta configuración vertical sobre sustrato horizontal, no queda duda alguna de la mejor elección. Sin embargo, queda estudiar el comportamiento de los dos tipos de boquillas en aporte con el cabezal o el sustrato inclinado (o ambos) para determinar la mejor opción en esa configuración de trabajo.

Tabla III-16. Valoración de la influencia de cada parámetro principal en diferentes características del cordón individual aportado.

Característica	Influencia de la potencia	Influencia del avance	Influencia del flujo de polvo
Dilución (%)	Baja	Alta a media	Alta a media
Eficiencia (%)	Alta a media	Alta	Baja
MDR (Kg·h ⁻¹)	Alta a media	Alta a media	Alta
Productividad (mm ² ·min ⁻¹)	Baja	Alta	Baja

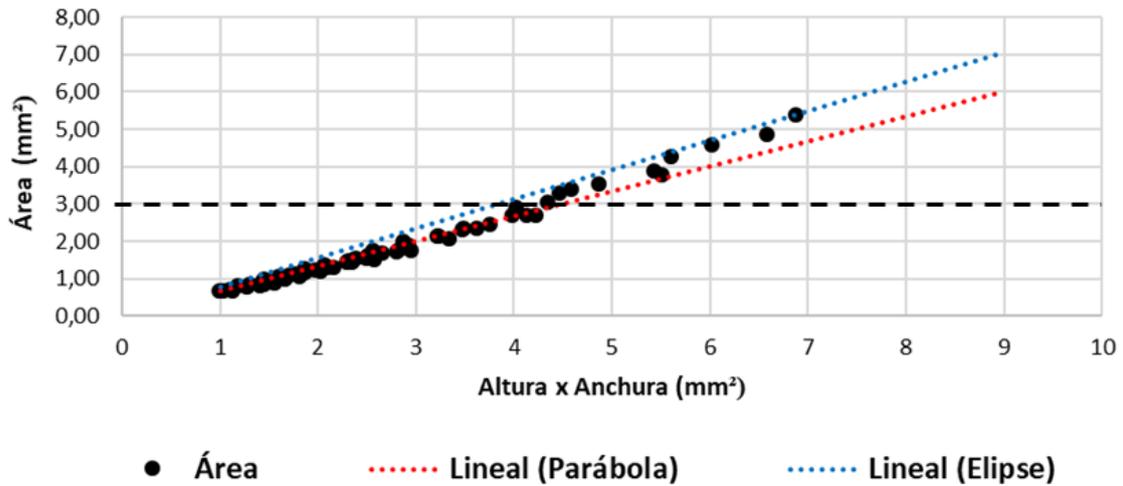
La conclusión principal de la caracterización del proceso de aporte es que la boquilla coaxial continua de 0,5 mm es superior en eficiencia, MDR y productividad a la boquilla coaxial discreta de 4 vías y presenta una menor dilución por lo que es la recomendada para aportar material con el cabezal vertical sobre sustrato horizontal. Con este cabezal, dentro del rango estudiado, se puede obtener una dilución mínima del 36%, una eficiencia del 90%, un MDR de $1,04 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y una productividad de hasta $4000 \text{ mm}^2\cdot\text{min}^{-1}$. Por el contrario, con la boquilla discreta de 4 vías se puede obtener una dilución mínima del 53%, una eficiencia del 64%, un MDR de $0,75 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y una productividad de hasta $3600 \text{ mm}^2\cdot\text{min}^{-1}$.

Desde el punto de vista de la eficiencia, y dentro del rango estudiado, los resultados son mejores a mayor potencia y menor velocidad en ambas boquillas. El flujo de polvo tiene una influencia baja en la eficiencia.

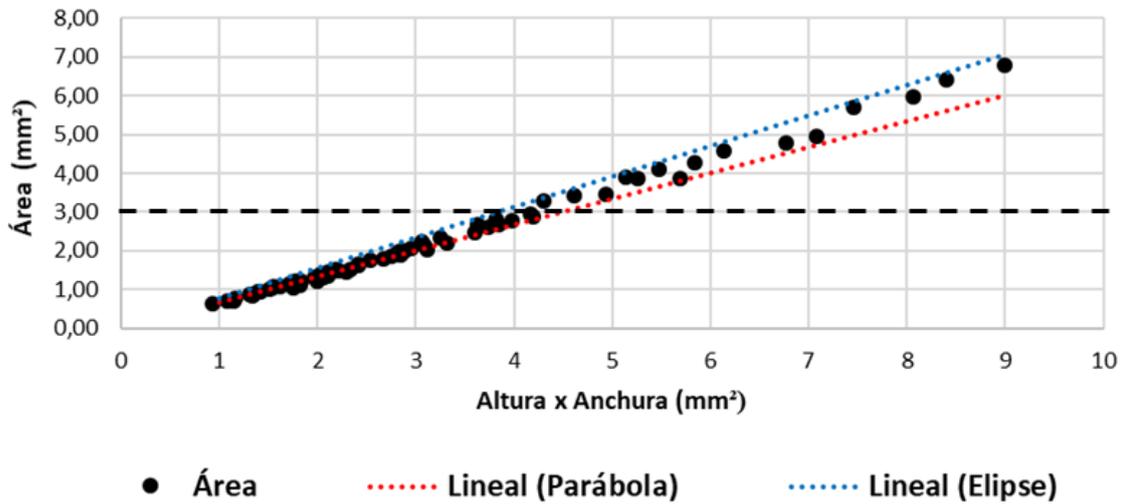
En cuanto a la influencia de los parámetros sobre el proceso, la influencia de la potencia en la altura del cordón es muy baja, siendo prácticamente nula en el caso de la boquilla coaxial continua. En el caso del área y penetración la potencia influye sin ser el parámetro más importante. Por el contrario, tiene una influencia alta en la anchura de la sección transversal del cordón aportado. Independientemente de la influencia que tenga en cada característica del cordón, la potencia es un factor crítico en la calidad del material aportado (poros). Por otro lado, el avance muestra una influencia alta en todas las características geométricas analizadas del cordón individual. Por último, el flujo másico de polvo tiene lógicamente una influencia alta en la altura y área del cordón, sin embargo, tiene poca influencia en la anchura y penetración.

Para terminar la caracterización experimental del proceso, se ha obtenido un modelo de la geometría de la sección transversal del cordón aportado. Para ello, se ha realizado un estudio para determinar si el área del material aportado y de la zona de dilución con el sustrato presentan similitudes con el área de una parábola de segundo grado o con una elipse.

Para analizar la forma de la sección transversal del material aportado se ha comparado el producto de la altura y la anchura con el área para saber si está más cerca del valor de una parábola de segundo grado o de una elipse. Con ambas boquillas la forma ha sido más parecida a una parábola de segundo grado con valores de área menores de 3 mm^2 y más una forma intermedia de ambas con valores superiores como se puede ver en la Figura III-56.



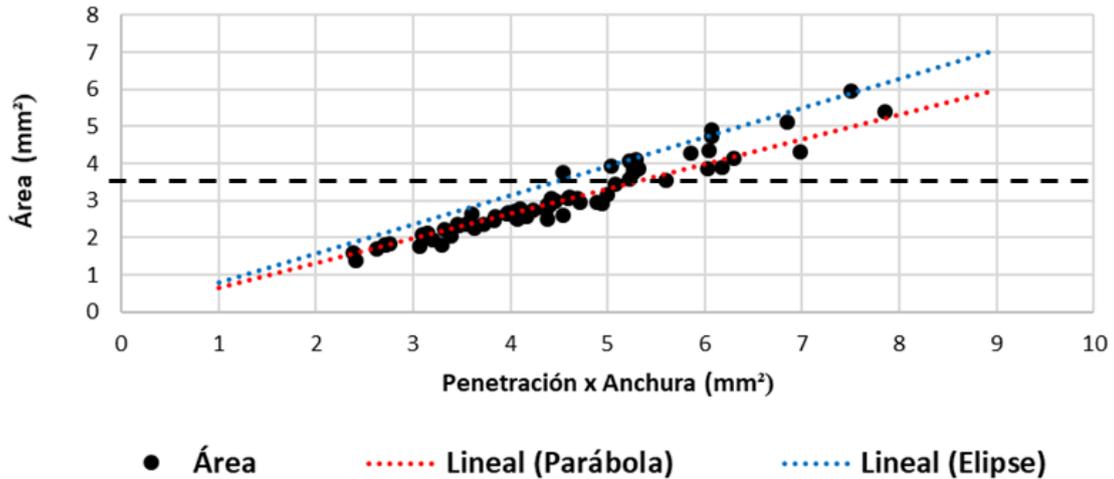
a)



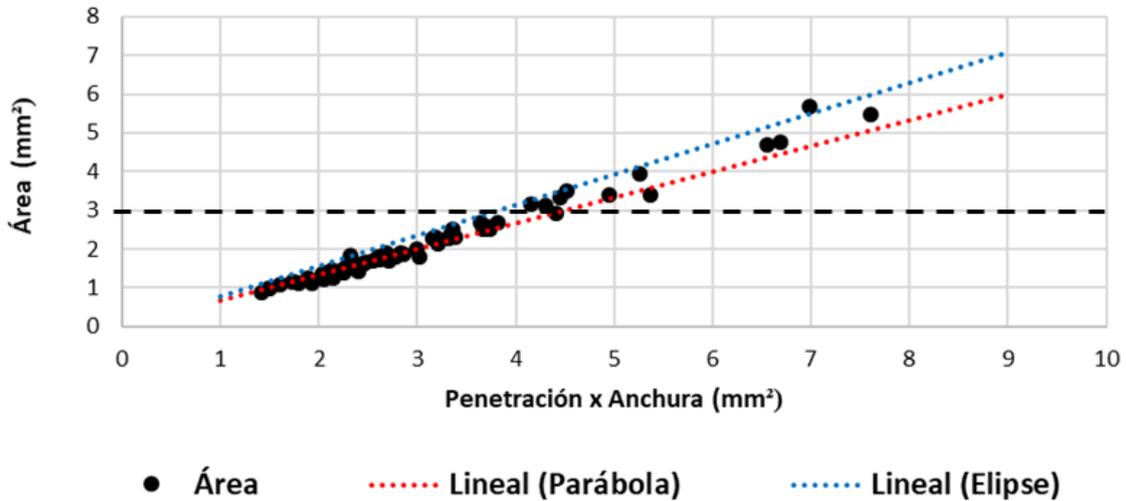
b)

Figura III-56. Gráficas de la forma del área de la sección transversal del material depositado: a) Boquilla discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0.5 mm.

Realizando la misma gráfica para la sección transversal de la zona de la dilución, donde se ha comparado el área de la zona de la dilución con el producto de la penetración y la anchura, se ha obtenido que la forma es más parecida a una parábola de segundo grado con valores de área menores de 3,5 mm² y más una forma intermedia de ambas con valores superiores para la boquilla discreta de 4 vías (Figura III-57. a). En el caso de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm, la forma es más parecida a una parábola de segundo grado con valores de área menores de 3 mm² y más una forma intermedia de ambas con valores superiores (Figura III-57. b).



a)



b)

Figura III-57. Gráficas de la forma del área de la dilución de la sección transversal del material depositado: a) Boquilla discreta de 4 vías; b) Boquilla coaxial continua de 0.5 mm.

Empleando las ecuaciones de las características principales y suponiendo la forma del área aportada y de la dilución según lo obtenido en las Figuras III-56 y III-57, se ha generado un modelo geométrico de la sección transversal. La comparación de la geometría obtenida con el modelo y la sección real se puede ver en las Figuras III-58 y 59. Las diferencias entre el modelo y la sección real pueden atribuirse a las desviaciones de las ecuaciones y del proceso de la Tabla III-10.

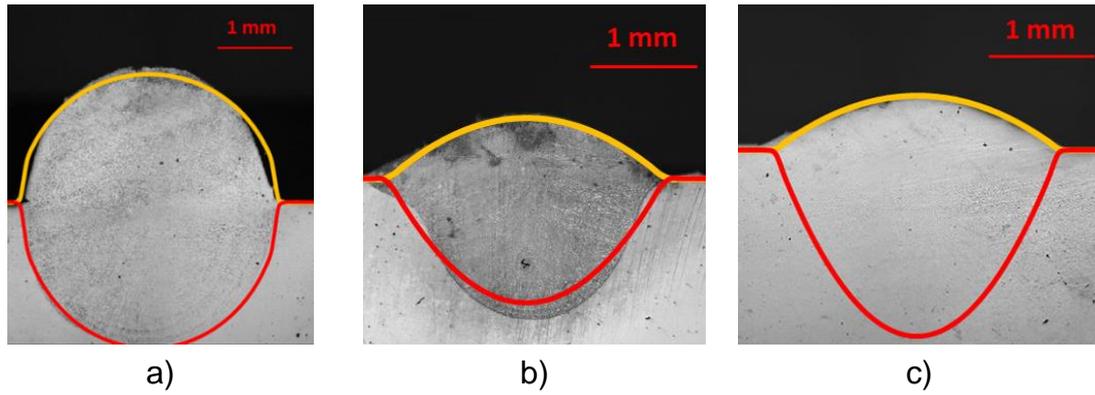


Figura III-58. Comparación del modelo de la sección transversal con las macrográficas de la sección real obtenida con la boquilla discreta de 4 vías (línea amarilla correspondiente al área y la roja a la zona de la dilución): a) 2500 W, 300 mm·min⁻¹ y 18 g·min⁻¹; b) 1900 W, 1100 mm·min⁻¹ y 18 g·min⁻¹; c) 2500 W, 900 mm·min⁻¹ y 11 g·min⁻¹.

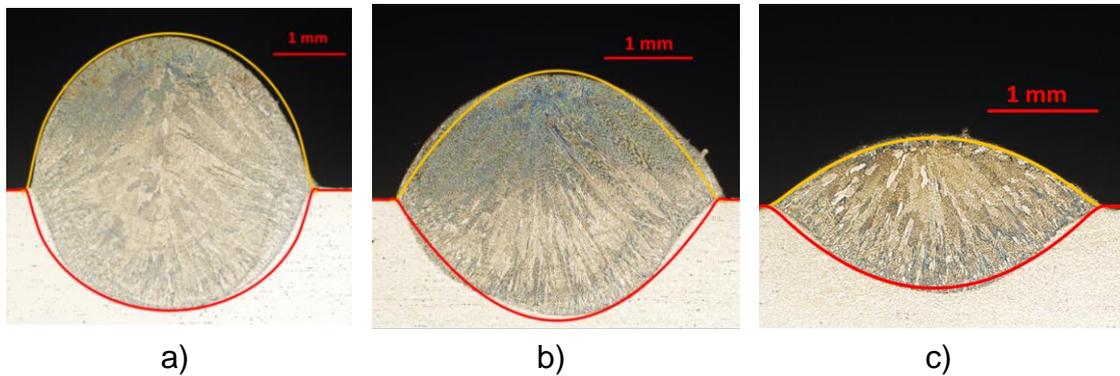


Figura III-59. Comparación del modelo de la sección transversal con las macrográficas de la sección real obtenida con la boquilla coaxial continua de 0.5 mm (línea amarilla correspondiente al área y la roja a la zona de la dilución): a) 2500 W, 300 mm·min⁻¹ y 18 g·min⁻¹; b) 2500 W, 500 mm·min⁻¹ y 18 g·min⁻¹; c) 1900 W, 900 mm·min⁻¹ y 14 g·min⁻¹.

Por último, tal y como se ha visto en el estado del arte, la estructura obtenida en material aportado y en la zona de dilución ha sido columnar, obteniendo granos de mayor tamaño a menor velocidad de aporte. Esto es debido a que la cantidad de energía aportada en el baño fundido es mayor a menor velocidad por lo que se alcanzan mayores temperaturas y tiempos de enfriamiento más lentos lo que produce un mayor tamaño de los granos columnares.

4.2 Estudio del efecto de la inclinación del sustrato y del cabezal en el proceso de aporte.

En el proceso de fabricación, recubrimiento o reparación de geometrías complejas mediante aporte láser, es necesario inclinar el sustrato, el cabezal o ambos dependiendo de la configuración cinemática del equipo utilizado. Como consecuencia la mayoría de las máquinas de aporte láser presentan una configuración cinemática de 5 ejes.

Aunque los efectos de la gravedad y la inclinación en el proceso de aporte son conocidos no está claro como estos fenómenos afectan al material aportado. Estos efectos deben ser considerados al generar la trayectoria de aporte ya que pueden afectar a la geometría del material y al porcentaje de solapamiento entre cordones, así como al crecimiento entre capas. Además, no está claro cómo afectan a la eficiencia del proceso por lo que es necesario definir la estrategia de aporte más eficiente.

Este estudio está enfocado en la evaluación cuantitativa del efecto de la gravedad y la inclinación al emplear dos tipos distintos de boquillas (continua con ranura de 0,5 mm y discreta de 4 vías) utilizando como material de aporte Inconel 718. Para realizar el estudio, se ha medido la evolución de las características geométricas con respecto al aporte vertical en sustrato horizontal de dos cordones seleccionados de la caracterización del proceso de aporte realizado en el apartado anterior. La selección se ha realizado en función de términos como la calidad (sin poros ni grietas), eficiencia máxima, un MDR superior a $0,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y una relación de aspecto entre 3 y 5 (relación entre anchura y altura). Este último parámetro está relacionado con la aparición de poros y grietas [Cárcel, 2014].

Se han definido 3 tipos de estrategias de aporte para analizar los efectos de la gravedad y la inclinación en el proceso (Figura III-60). Los ángulos α y β han sido definidos en cada estrategia: α es el ángulo de inclinación del cabezal respecto al eje vertical, y β es el ángulo de inclinación del sustrato respecto al eje horizontal. Las 3 estrategias son las siguientes:

1. Estrategia 1 ($\alpha = \beta$, Figura III-60.a): Tanto el sustrato como el cabezal láser están inclinados. Como ambos presentan el mismo ángulo de inclinación, el aporte es perpendicular. Por tanto, solo la gravedad afecta a las características del material aportado.
2. Estrategia 2 ($\alpha = 0$, Figura III-60.b): El cabezal láser permanece verticalmente mientras que el sustrato está inclinado. En esta estrategia el proceso de aporte está influido solamente por la inclinación del sustrato.
3. Estrategia 3 ($\beta = 0$, Figura III-60.c): Una combinación de las estrategias anteriores. El cabezal aporta de forma inclinada sobre un sustrato horizontal por lo que la gravedad y la inclinación afectan al proceso y a las características del material aportado.

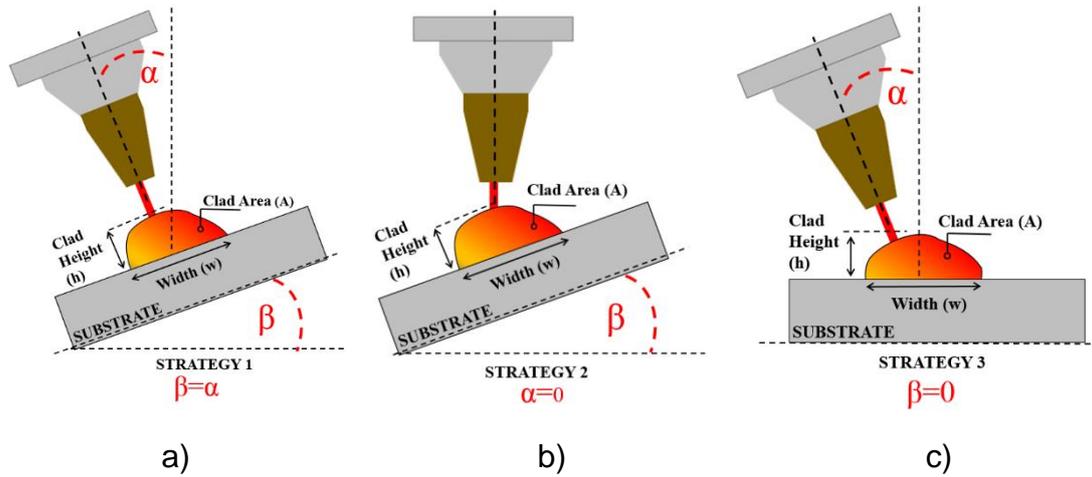


Figura III-60. Estrategias del estudio del efecto de la inclinación y la gravedad en el proceso de aporte: (a) Estrategia 1 ($\alpha=\beta$); (b) Estrategia 2 ($\alpha=0$); (c) Estrategia 3 ($\beta=0$).

Las características y parámetros de los cordones seleccionados están en la Tabla III-17.

Tabla III-17. Parámetros y características de los cordones seleccionados

Parámetros y características	Discreta de 4 vías		Continua	
	\dot{m}_p (g·min ⁻¹)	18		14
P (W)	2500		2500	
v (mm·min ⁻¹)	500	900	500	900
Calidad	Sin defectos	Sin defectos	Sin defectos	Sin defectos
Relación de aspecto	3,1	4,84	3,54	4,87
η_p (%)	60,1	51,3	85,4	78,6
MDR (Kg·h ⁻¹)	0,65	0,54	0,71	0,66

Al igual que en otros estudios, se han analizado 4 secciones transversales de cada cordón aportado. También se ha analizado la simetría de los cordones comparando las secciones transversales con el modelo geométrico empírico del área de la sección transversal, obtenida en el apartado anterior. El modelo compara la sección transversal con una parábola de segundo grado o una mezcla de una parábola de segundo grado y una elipse, según el valor del área. Se ha calculado la diferencia del área a ambos lados del eje de simetría del cordón aportado. Los parámetros utilizados en el estudio están en la Tabla III-18.

Tabla III-18. Parámetros del proceso para el estudio del efecto de la inclinación y la gravedad.

Parámetros	Valores
P (W)	2500
v (mm·min ⁻¹)	500 y 900
\dot{m}_p (g·min ⁻¹)	14 (Continua)-18 (Discreta de 4 vías)
α or β (°)	0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30°
Tipo de boquilla	Continua (ranura de 0,5 mm), discreta (4-vías)

Los resultados de las características geométricas del cordón (h, w, y A) obtenidos usando las diferentes estrategias y las diferentes boquillas coaxiales con un avance de 500 mm·min⁻¹ se muestran en la Figura III-61. Los resultados muestran la evolución de las características con respecto al cordón utilizado como control ($\alpha = 0, \beta = 0$) a diferentes ángulos de inclinación tanto del sustrato como del cabezal láser. Los resultados del área son proporcionales al MDR y la eficiencia (Eq. 3 y Eq. 32).

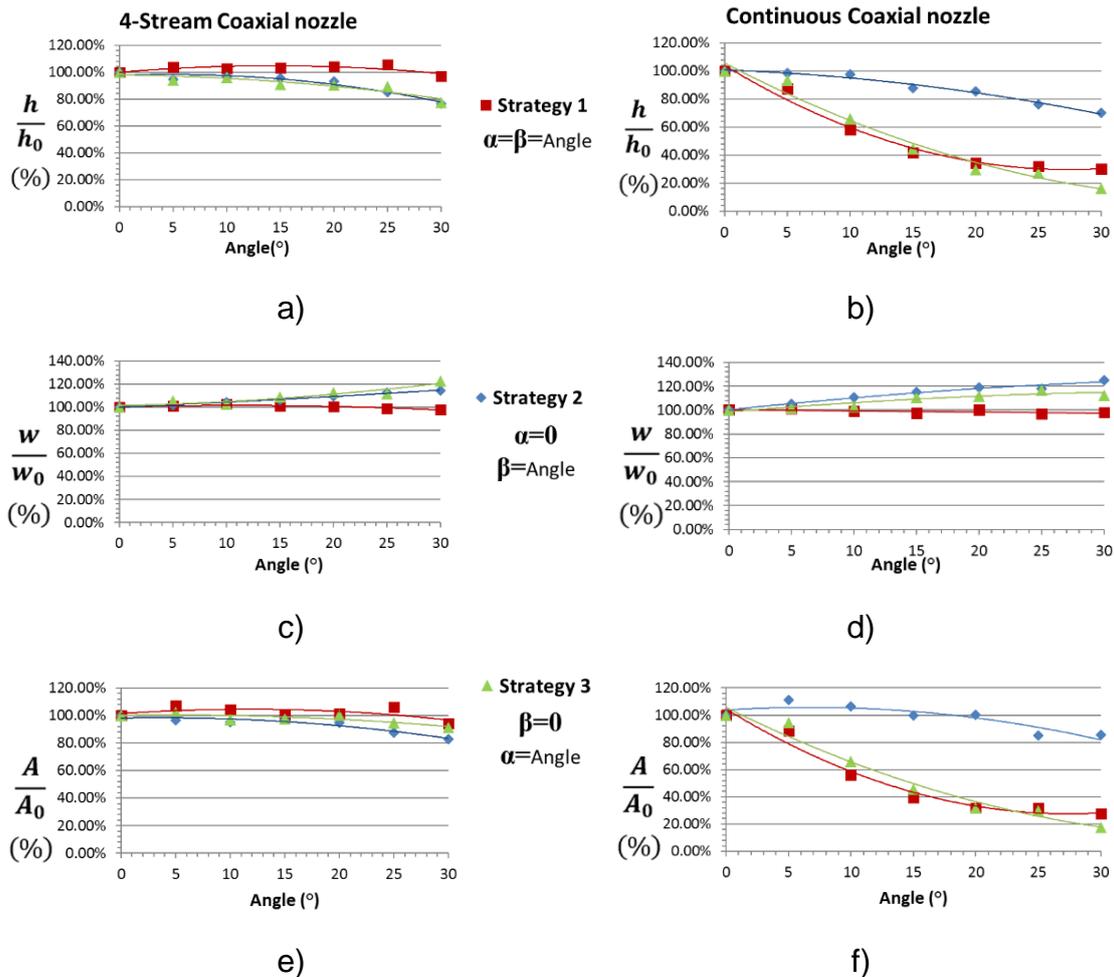


Figura III-61. Evolución de las características dimensionales del cordón con un avance de 500 mm·min⁻¹ respecto del control: a), c) y e) boquilla discreta de 4 vías; b), d) y f) boquilla continua.

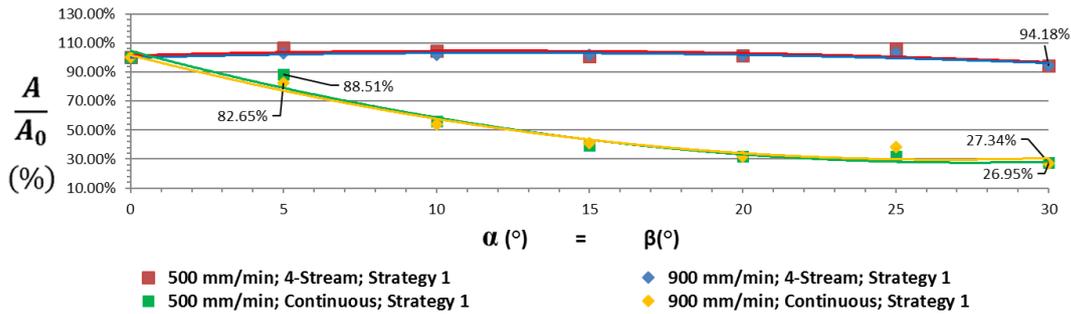


Figura III-62. Evolución del área respecto a α y β , y avances de 500 y 900 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Como se esperaba con la Estrategia 1 ($\alpha = \beta$), no se observaron efectos gravitacionales significativos al inclinar la boquilla discreta de 4 vías. Por el contrario, cuando se emplea la boquilla coaxial continua, la altura del cordón se reduce al 87,3% respecto de la altura del cordón de control al alcanzar un ángulo de inclinación de 5 ° y al 30,1% al alcanzar un ángulo de inclinación de 30°. Por otro lado, la anchura del cordón permanece constante en ambas boquillas respecto al control, ya que depende principalmente del tamaño del spot y la potencia del láser, los cuales han sido constantes. Dado que la eficiencia y el MDR son proporcionales al área, sufren la misma evolución que esta respecto al cordón de control. Por lo tanto, el área, el MDR y la eficiencia del polvo se reducen al 88,5% con un ángulo de inclinación de 5°, y al 27,3% con un ángulo de inclinación de 30° en el caso de la boquilla coaxial continua.

Esta reducción dimensional, debida a la desviación del flujo de polvo, es causada por efectos gravitacionales. En la boquilla discreta, el polvo es suministrado por cuatro inyectores individuales con un diámetro de 2 mm, generando un flujo de polvo que converge correctamente a la distancia de trabajo. Por el contrario, en la boquilla coaxial continua, el polvo entra en una cámara de expansión en forma de anillo dentro de la boquilla, reduciendo la velocidad del flujo. En esta cámara, se forma una "nube de polvo" homogénea que luego es introducida en una boquilla con forma de cono y una ranura de salida de 0,5 mm, creando a la salida un flujo de polvo en forma de cono hueco. Al inclinar la boquilla coaxial continua, la gravedad afecta a la distribución homogénea del polvo obtenida en la cámara de expansión durante su transcurso hasta la ranura con forma de cono, desviando el polvo hacia el mismo lado (Figura III-63). A mayor inclinación, la cantidad desviada de polvo aumenta, al igual que también aumentan las perturbaciones en el flujo causadas por la interacción de las partículas de polvo entre sí en el mismo lado de la ranura. Por lo tanto, con la boquilla coaxial continua el flujo de polvo cambia funcionando más como una boquilla lateral con alta divergencia, causando una distribución dispersa del polvo en el baño fundido.

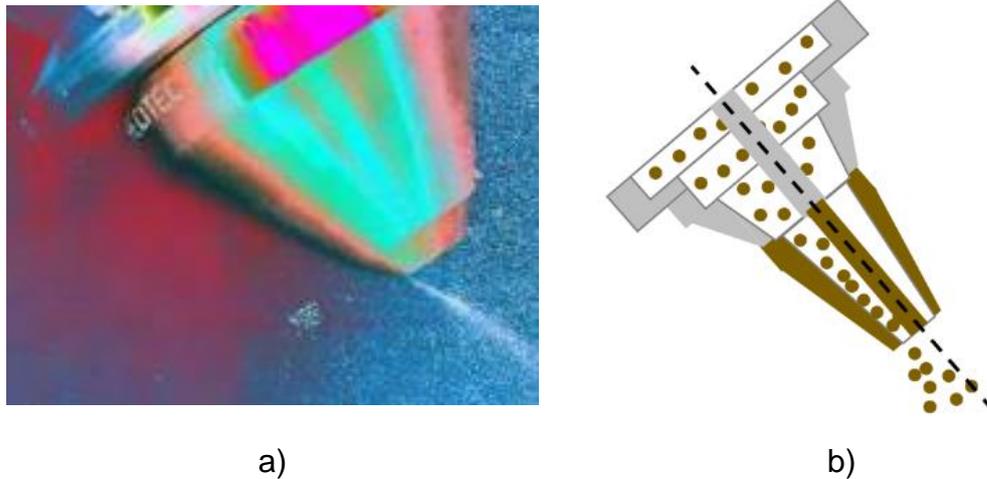


Figura III-63. Efecto de la gravedad en la boquilla continua: a) real; b) esquema.

Se observa un comportamiento diferente al emplear la Estrategia 2 ($\alpha = 0$). En este caso, la altura del cordón presenta una tendencia similar en ambas boquillas: una altura más baja a mayor valor del ángulo de inclinación del sustrato (β). Con un ángulo de 30° , la altura se reduce al 76,7% y al 70% del cordón de control con la boquilla discreta y la boquilla continua, respectivamente. Por el contrario, la anchura del cordón aumenta a medida que aumenta la inclinación del sustrato, alcanzando un 114,3% y 125,1%, a 30° , para la boquilla discreta y la boquilla continua, respectivamente. Este aumento se produce debido a la proyección elíptica del diámetro del spot láser en el sustrato inclinado, ensanchando el baño fundido y, por lo tanto, aumentando la superficie en la que el polvo puede quedar atrapado. Sin embargo, solo la boquilla coaxial continua muestra un ligero aumento del área en ángulos inferiores a 15° y, en consecuencia, un aumento de la eficiencia y el MDR. El área, el MDR y la eficiencia del polvo permanecen constantes en ángulos inferiores a 20° con la boquilla discreta. Por lo tanto, incrementar el baño fundido muestra un efecto débil en la captación de polvo. A 30° , el área se reduce a 82,8 % y 85,8 % para la boquilla discreta y la boquilla continua, respectivamente.

Esta reducción del área ocurre porque al inclinar el sustrato, parte del baño fundido donde se deposita el material, está fuera de la distancia de trabajo óptima. Hasta 20° , la reducción de la altura está relacionada con la tensión superficial del baño fundido que depende del equilibrio entre varias fuerzas, como la fuerza de Marangoni [Egry, 2010]. El flujo de convección del material dentro del baño de fundido no solo influye en su geometría final, sino que también afecta a las temperaturas máximas alcanzadas [Arrizubieta, 2017-b]. En este caso, la anchura aumenta mientras que el área permanece sin cambios. Por lo tanto, la forma del baño fundido cambia a una con una menor superficie, debido

a la reducción en la altura. En ángulos mayores de 20°, la reducción de altura se relaciona con el efecto combinado de la tensión superficial y una menor eficiencia en la cantidad de polvo aportado. Este cambio de forma del baño fundido aumenta la relación de aspecto y disminuye el ángulo de mojado del cordón (Figura III-64). Esto último está relacionado con el aumento de la fuerza adhesiva del baño fundido con el sustrato.

Los resultados obtenidos al emplear la Estrategia 3 ($\beta = 0$) pueden explicarse por los resultados obtenidos con las otras dos estrategias, ya que combina el efecto gravitacional de la inclinación del cabezal (Estrategia 1) con el efecto de la inclinación del sustrato (Estrategia 2). En el caso de la Estrategia 3, tanto la altura como la anchura del cordón se ven afectados por la no perpendicularidad cuando se usa la boquilla discreta, y por una combinación de ambos efectos cuando se usa la boquilla continua. En el caso de la boquilla discreta, los efectos de la Estrategia 2 y la Estrategia 3 son similares, aunque con algunas diferencias. Con la estrategia 2 se reduce el área al 82,8%, mientras que con la estrategia 3 se reduce el área al 91,1%. Si bien estos resultados son similares, apuntan a algunas diferencias en la cantidad de polvo aportado que merecen ser estudiados más a fondo en el futuro. En el caso de la boquilla continua, la Estrategia 3 combina la reducción de altura de la Estrategia 1 con el aumento de la anchura de la Estrategia 2. Como resultado, el área que genera la Estrategia 3 es mayor que el área generada por la Estrategia 1, hasta un ángulo de 20°. En ángulos mayores, el aumento de la anchura debida a la no perpendicularidad es insuficiente para compensar la desviación del flujo de polvo debida a la inclinación de la boquilla. Por lo tanto, la altura y el área de los cordones son menores que en la Estrategia 1. Como resultado, el área, el MDR y la eficiencia del polvo varían solo ligeramente cuando se inclina el cabezal de la boquilla discreta, mientras que esos mismos parámetros se reducen hasta el 17,5% con la boquilla continua.

Teniendo en cuenta los resultados del estudio, queda claro que la boquilla coaxial continua debe descartarse en configuraciones de trabajo que impliquen inclinar el cabezal para mantener las ventajas que presenta respecto a la boquilla discreta de 4 vías.

Finalmente, se ha observado que la simetría del área aportada no difiere del estudio del cordón simple, a excepción de los cordones aportados con la Estrategia 1 a 30° (Figura III-64). En este caso, con un avance de 500 mm·min⁻¹, el porcentaje del área total separada por el eje de simetría ha sido de 42,7% y 57,3%, respectivamente, donde la mayor área se deposita en la dirección de la gravedad.

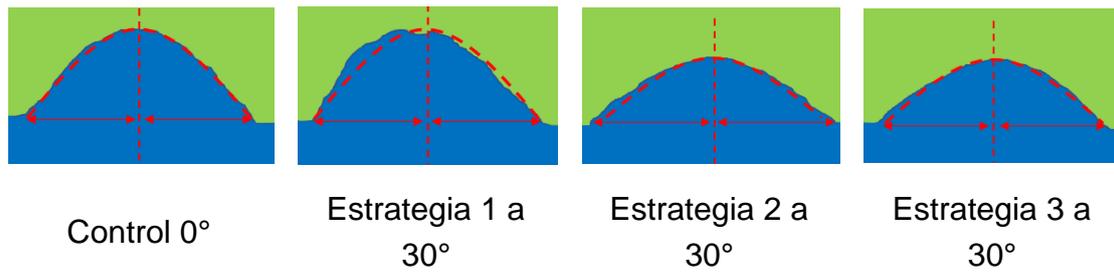


Figura III-64. Comparación de la sección transversal de los cordones obtenidos con la boquilla discreta (en azul) con el modelo empírico (línea roja) a diferentes ángulos y estrategias, y un avance de $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. La relación de aspecto aumenta y el ángulo de mojado disminuye en las estrategias 2 y 3.

Esta asimetría a 30° se debe a que el esfuerzo cortante resultante de la gravedad aumenta con el ángulo de inclinación. Antes de la solidificación, la viscosidad no es suficiente para resistir el esfuerzo cortante. Debido a que cada capa del baño fundido se mueve más rápido que la que está debajo, la distorsión aumenta con la altura. En contraste, la Estrategia 2 ($\alpha = 0$) y la Estrategia 3 ($\beta = 0$) presentan mayor anchura y una altura y área menores a mayor ángulo. Por lo tanto, los aumentos de la anchura y la reducción de la altura reducen las distorsiones del baño fundido causadas por el esfuerzo cortante. Además, el ángulo de mojado disminuye aumentando las fuerzas adhesivas al sustrato.

4.3 Estudio del proceso de aporte en la fabricación de una pared inclinada

El objetivo de este estudio es extender los resultados obtenidos en las secciones anteriores en el caso del cordón simple al caso genérico de fabricación de paredes inclinadas de dos cordones solapados por capa sobre un sustrato horizontal ($\beta = 0$) con el fin de definir los límites geométricos del proceso. Para ello, se han definido dos estrategias (Figura III-65):

- Estrategia A (4 ejes, Figura III-65.a): el cabezal láser se inclina de acuerdo con la inclinación de la pared ($\theta = 90 - \alpha$). Usando esta estrategia, el material se aporta en la dirección de inclinación de la pared.
- Estrategia B (3 ejes, Figura III-65.b): el cabezal láser se mantiene en posición vertical ($\alpha = 0$). Usando esta estrategia, el material se aporta verticalmente.

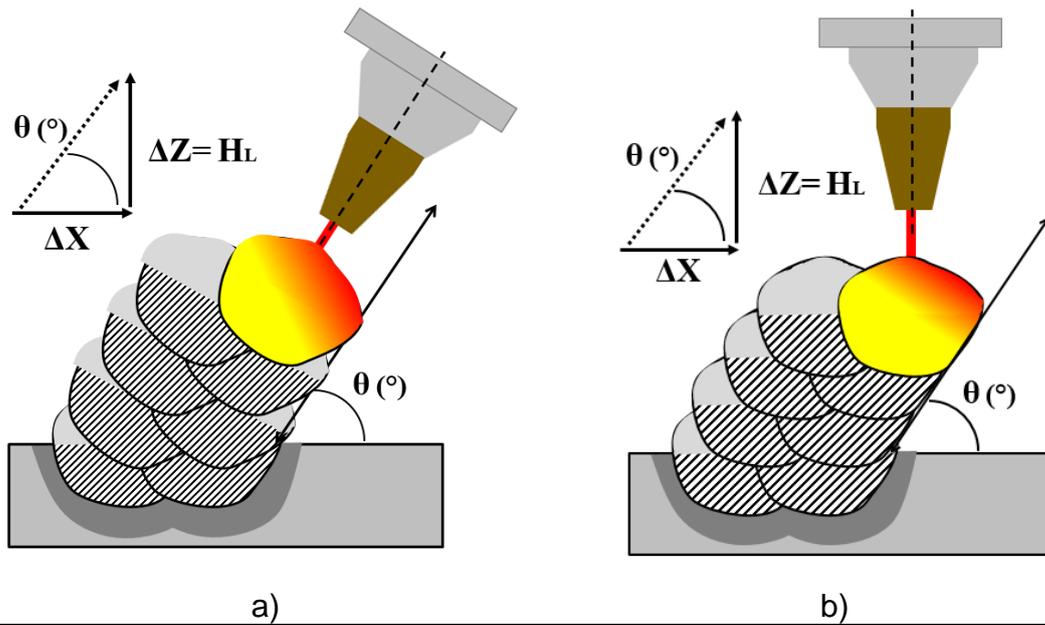


Figura III-65. Estrategias para la fabricación de paredes inclinadas: a) Estrategia A (4-ejes); b) Estrategia B (3 ejes).

La opción de mantener el cabezal perpendicular e inclinar el sustrato para fabricar una pared inclinada es la opción más fácil para la fabricación de paredes multicapa sin una pérdida de forma producida por la tensión cortante de la gravedad en el material aportado [Möller, 2016]. Sin embargo, esa opción requiere una mesa inclinable, que no es una característica de la máquina híbrida utilizada. Por tanto, se ha desechado esta estrategia del estudio.

El ángulo de la pared se ha obtenido definiendo el desplazamiento horizontal y vertical (ΔX y ΔZ , respectivamente) en cada capa de la trayectoria de aporte. Estos dos valores se han calculado (Eq. 34 y 38) con el ángulo de pared deseado (θ) y la altura de la capa (H_L). El ángulo θ está relacionado con el ángulo α (ángulo del estudio de la Estrategia 3 en el apartado anterior) en la Estrategia A. La altura de la capa (H_L) se ha calculado (Eq. 35) dividiendo el área total de la capa (A_T) por la suma de la anchura total (W_T) y el desplazamiento horizontal (ΔX), suponiendo que el material de cada capa cubre toda el área necesaria para obtener una pared perfecta sin ondulaciones (Figura III-66.a). El área y la anchura total de la capa se han calculado utilizando las Ecuaciones 36 y 37, respectivamente, donde N_c es el número de cordones por capa. El área (A) y la anchura (w) del cordón individual se han calculado utilizando los resultados obtenidos en el apartado anterior para cada condición de α y β , donde d_o es el porcentaje de solapamiento de los cordones, y K es un factor de corrección que tiene en cuenta el aumento de la anchura total al aumentar el número de capas, hasta que se alcanza una anchura estable. Este fenómeno, que se muestra en la Figura III-66.b, ocurre debido al desplazamiento del baño fundido causado por

la forma de la superficie de la capa anterior y el aumento de la temperatura de la pared, y puede reducirse controlando la potencia del láser según la medición de la temperatura alcanzada. El número de capas de cada pared (N_L) ha sido de 30.

Los parámetros del proceso para el aporte de paredes multicapa se muestran en la Tabla III-19. El porcentaje de solapamiento y el tiempo de espera entre pasadas se seleccionaron de trabajos anteriores. Para evaluar los efectos de la inclinación sobre la geometría de la pared, la distancia entre las líneas centrales de los dos cordones solapados se ha mantenido constante con el mismo valor que para una pared vertical.

$$\Delta Z = H_L \quad \text{Eq. 34}$$

$$H_L = \frac{A_T}{(W_T + \Delta X)} \quad \text{Eq. 35}$$

$$A_T = N_c \cdot A \quad \text{Eq. 36}$$

$$W_T = w + w \cdot (N_c - 1) \cdot (1 - d_o) + K \quad \text{Eq. 37}$$

$$\Delta X = \frac{\Delta Z}{\tan \theta} = \frac{-W_T \pm \sqrt{W_T^2 + 4 \cdot \left(\frac{N_c \cdot A}{\tan \theta}\right)}}{2} \quad \text{Eq. 38}$$

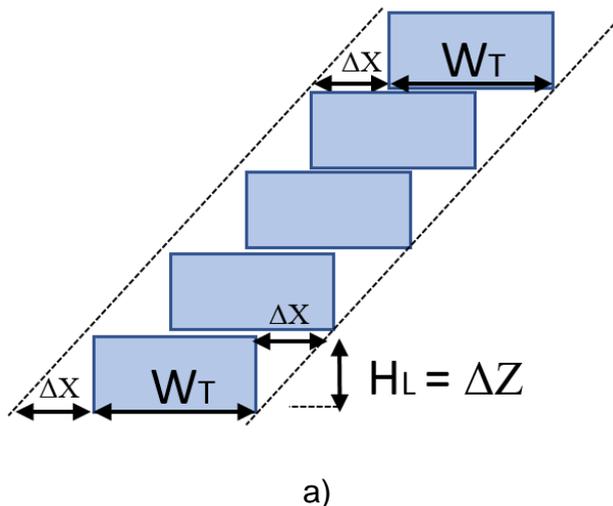


Figura III-66. a) Esquema para el cálculo de la anchura total de la pared; b) Incremento de la anchura de la pared hasta alcanzar un valor constante.

Tabla III-19. Parámetros del proceso para el aporte de paredes inclinadas.

Parámetros del proceso	Valores
P (W)	2500
v (mm·min ⁻¹)	500 (900 cuando no fue posible con 500)
\dot{m}_p (g·min ⁻¹)	14 (continua)-18 (discreta)
d _o (%)	50
θ (°)	90, 80, 70 and 60
N _L (-)	30
N _c (-)	2
D _w (s)	5
Tipo de boquilla	Continua (0,5 mm), discreta (4-vías)

Aunque la intención inicial era probar ambas estrategias con ambos tipos de boquillas coaxiales (continua y discreta), la boquilla continua solo se ha empleado en la Estrategia B debido a los malos resultados obtenidos en el análisis de los efectos de la inclinación del cabezal y del sustrato (visto en el apartado anterior).

Los resultados se han analizado en términos de geometría, eficiencia del polvo y MDR. En este caso, la eficiencia del polvo se ha calculado pesando el sustrato antes y después de la deposición (m_i y m_f , respectivamente) y utilizando la Ecuación 39, donde t_{DED} es el tiempo de procesamiento de la pared. El MDR se ha calculado utilizando la Ecuación 32. Finalmente, la geometría de la pared se ha evaluado mediante los valores de la anchura total (W_w), la altura de la pared (H_w), la anchura inicial (W_i), que es el ancho de la pared antes del aumento que sufre en las sucesivas capas (K), y la longitud (L_w) de la pared (Figura III-67). Estas dimensiones se han medido empleando la sección transversal de la pared, con el software Clemex Captiva®. Los valores medidos se han comparado con los valores teóricos obtenidos con las Ecuaciones 40 a 43.

$$\eta_p = \frac{(m_f - m_i)}{(\dot{m}_p \cdot t_{DED})} \quad \text{Eq. 39}$$

$$H_w = H_L \cdot N_L \quad \text{Eq. 40}$$

$$W_i = W_T - K \quad \text{Eq. 41}$$

$$W_w = (W_T + \Delta X) \cdot \sin \theta \quad \text{Eq. 42}$$

$$L_w = \frac{H_w}{\sin \theta} \quad \text{Eq. 43}$$

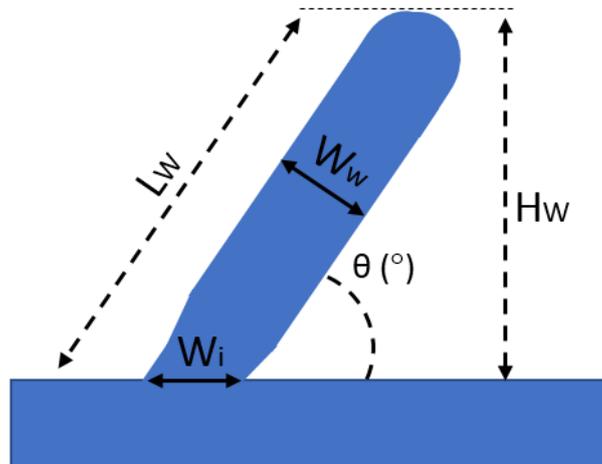


Figura III-67. Dimensiones geométricas de la pared.

Aunque se han podido fabricar las paredes con ángulos entre 60° y 90° con la boquilla discreta empleando la Estrategia A (Figura III-68), no se han podido fabricar sin defectos a $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ en ángulos menores de 80° con la Estrategia B.

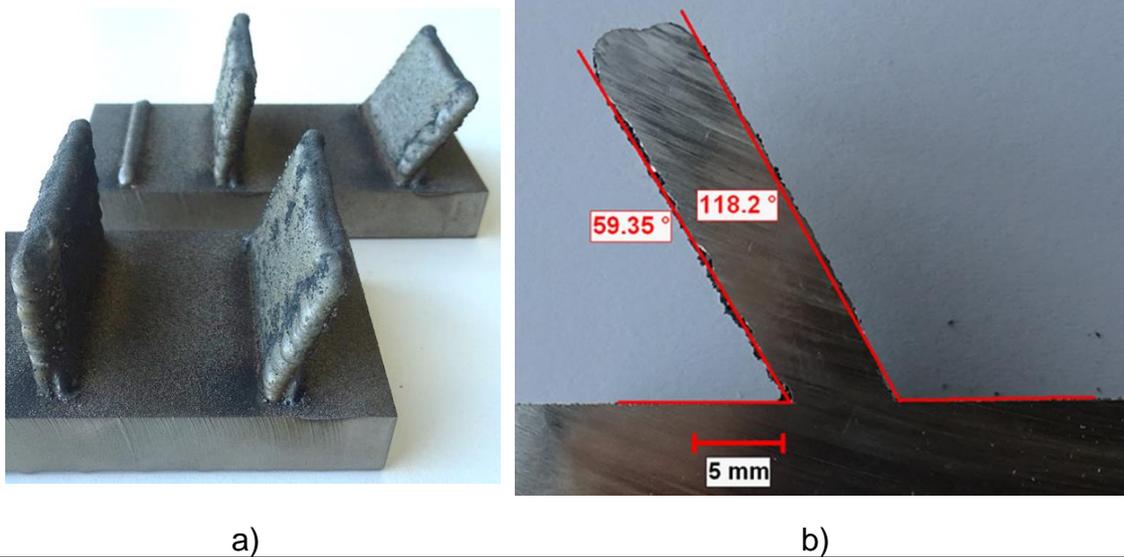


Figura III-68. Paredes inclinadas fabricadas con la boquilla discreta y la Estrategia A: a) Ángulos de 60° , 70° , 80° y 90° ; b) Sección transversal de una pared con ángulo de 60° .

La Tabla III-20 resume los resultados de la eficiencia del polvo y el MDR al fabricar paredes inclinadas con las diferentes estrategias y los diferentes tipos de boquillas.

Tabla III-20. Eficiencia y MDR con diferentes boquillas, estrategias y ángulos de inclinación (las paredes fabricadas con defectos están marcadas con "X", las paredes obtenidas a 900 mm·min⁻¹ están marcadas con *)

θ (°)	Parámetros	Discreta		Continua
		Estrategia A	Estrategia B	Estrategia B
90	η_p (%)	54,65	54,10	79.75
	MDR (Kg·h ⁻¹)	0,59	0,58	0.67
80	η_p (%)	55,62	48,65	80.88
	MDR (Kg·h ⁻¹)	0,60	0,52	0.68
70	η_p (%)	54,89	48.9*	X X*
	MDR (Kg·h ⁻¹)	0,59	0.53*	X X*
60	η_p (%)	54,53	48.1*	X X*
	MDR (Kg·h ⁻¹)	0.59	0.52*	X X*

En comparación con el caso del cordón individual, a 90°, la eficiencia disminuye con ambas boquillas (4–6% menos). La máxima eficiencia del polvo y los mayores valores del MDR se obtienen con la boquilla continua empleando la Estrategia B, pero no ha sido posible fabricar paredes sin defectos en ángulos inferiores a 80°. La Estrategia A, con la boquilla discreta, genera en todos los casos paredes con eficiencia y MDR similares a los del cordón individual.

El deterioro de las paredes con la Estrategia B en ángulos menores de 80° se debe a un menor crecimiento horizontal ΔX por capa que el esperado. El material del borde de la pared debe mantener una forma con poca distorsión para un correcto crecimiento multicapa. La forma del material fundido depende de si la tensión superficial y la viscosidad a la temperatura del proceso de aporte son suficientes para resistir el esfuerzo cortante producido por la gravedad. Además, el tiempo durante el cual la gravedad puede deformar el material fundido depende de la velocidad de enfriamiento que, a su vez, depende de cada estrategia y de los parámetros del proceso.

Debido a que con la Estrategia A el cabezal está inclinado, la dilución se dirige hacia el núcleo de la pared y el spot láser sufre una proyección elíptica. Por lo tanto, la temperatura es más baja y la dilución en el borde de la pared es menos profunda. Estos hechos, combinados con un baño fundido de mayor anchura y un cordón con una altura menor, contribuyen a una menor superficie y a una forma más estable, reduciendo la distorsión en el borde de la pared debido a la gravedad, permitiendo ángulos más pequeños.

Por el contrario, la Estrategia B aporta el material con el cabezal dispuesto verticalmente. Por lo tanto, el proceso no presenta proyecciones elípticas del spot láser ni cambios en la geometría del material fundido. Además, al estar el láser en vertical, la temperatura y la dilución en el borde de la pared aumentan, y la forma del material depositado presenta una mayor distorsión debido a la gravedad. Este hecho reduce el incremento en el eje X (ΔX) de cada capa, y después de varias capas, el láser acaba dirigido hacia un área fuera de la pared. Como el valor mínimo de ΔX a 70° empleando la Estrategia B con ambas boquillas a $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ha sido de $0,3 \text{ mm}$, se ha definido como un nuevo requisito un incremento de ΔX inferior a $0,3 \text{ mm}$ con esa estrategia. Por lo tanto, es necesario adaptar los parámetros del proceso a este requisito. Como las paredes fabricadas a $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pueden cumplirlo, se han incluido en el estudio en los ángulos en que no se ha podido obtener la pared.

Con un avance de $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, ha sido posible obtener paredes con la boquilla discreta y la Estrategia B, pero en las paredes fabricadas con la coaxial continua, cada nueva capa ha presentado una mayor distorsión y falta de material en los bordes de la pared, reduciendo la longitud de la pared progresivamente (Figura III-69). Se han fabricado paredes de 20 mm de longitud en las mismas condiciones para mostrar la gravedad de este fenómeno en la forma de la pared (Figura III-70). También se han fabricado paredes con una potencia láser más baja (1900 W), para descartar la temperatura del baño fundido como una posible causa, pero todas las paredes han presentado el mismo defecto. Los buenos resultados con la boquilla discreta con la misma estrategia sugieren la influencia de las diferentes características de flujo de polvo (trayectoria, velocidad, concentración de polvo, etc.) de ambas boquillas en la dinámica del baño fundido como una posible causa. Por lo tanto, para obtener paredes sin distorsiones con la boquilla coaxial continua es necesario un $\Delta X < 0,15 \text{ mm}$ por capa, como en la pared obtenida a 80° . Este requisito reduce drásticamente la altura de la capa para mantener el ángulo de la pared. No se amplió el estudio con la boquilla coaxial continua, ya que obliga a trabajar a 70° dentro de un rango con una eficiencia similar a la boquilla discreta, pero con un MDR inferior a $0,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. En el caso de 60° , obliga a trabajar en un rango más típico de sistemas de 1 kW fuera del rango de parámetros utilizados en este estudio.

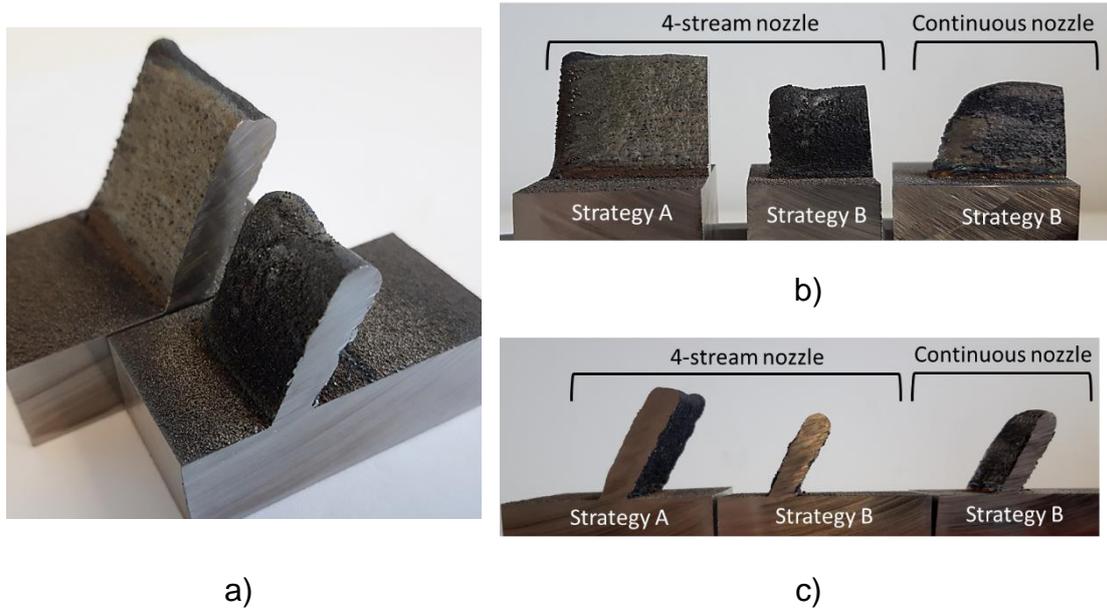


Figura III-69. Paredes a 60°: a) Comparación de paredes fabricadas con las Estrategias A y B y la boquilla discreta; b) Comparación de distorsiones en los bordes de la pared; c) Secciones transversales.

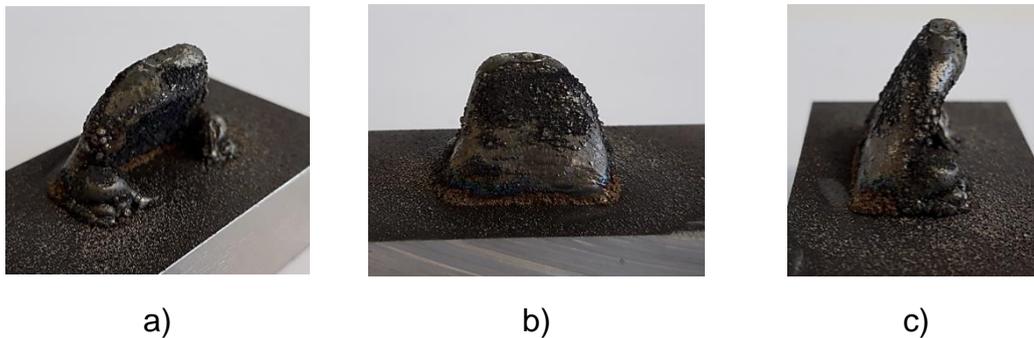


Figura III-70. Paredes a 60° con 20 mm de longitud fabricadas con la boquilla continua y la Estrategia B.

Los valores calculados de W_i , L_w y H_w en las paredes a $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ están bastante cerca de los valores reales (Figuras III-71 a 74) debido a que se han obtenido buenas aproximaciones de ΔX y ΔZ . Por el contrario, la anchura de la pared (W_w) presenta valores mayores a los calculados a menor ángulo, y una mayor ondulación, debido a la distorsión del borde de la pared durante el proceso de aporte láser. Estos efectos deben considerarse en los procesos de mecanizado posteriores. Los resultados con la Estrategia B a $900 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ presentan la misma tendencia que a $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. A pesar de los defectos presentados por las paredes fabricadas con la boquilla coaxial continua, las características medidas de la parte no afectada por la distorsión están bastante cerca de las dimensiones teóricas, a excepción de W_w , como en los otros casos.

Al emplear la Estrategia A con la boquilla discreta, la anchura y altura medidas han presentado un patrón en relación con el ángulo de la pared: tanto las dimensiones de W_i y W_w aumentan al reducir el ángulo de la pared, mientras que los valores de H_w y L_w disminuyen, produciendo así paredes más anchas y cortas con la misma eficiencia (Figuras III-71 a 74). Esta evolución debe considerarse al definir las trayectorias de aporte.

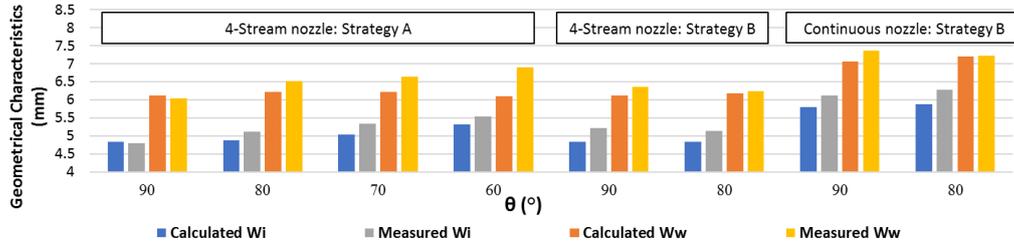


Figura III-71. Comparación de las dimensiones de la anchura inicial (W_i) y la anchura de la pared (W_w) a $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

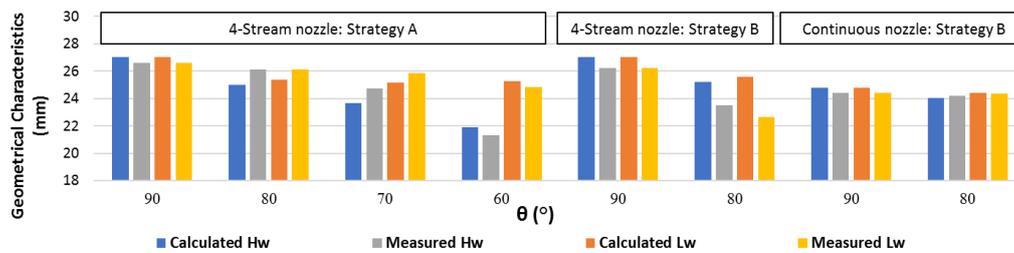


Figura III-72. Comparación de las dimensiones de la altura (H_w) y longitud de la pared (L_w) a $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

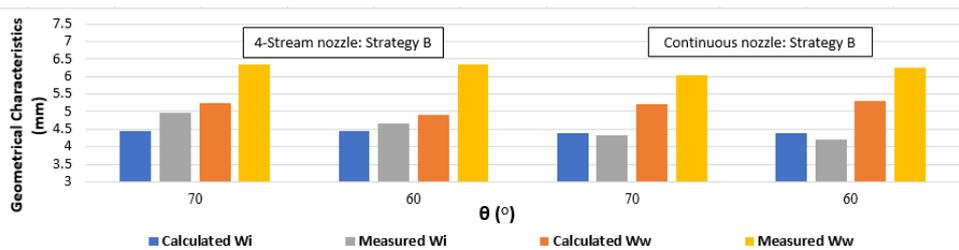


Figura III-73. Comparación de las dimensiones de la anchura inicial (W_i) y la anchura de la pared (W_w) a $900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

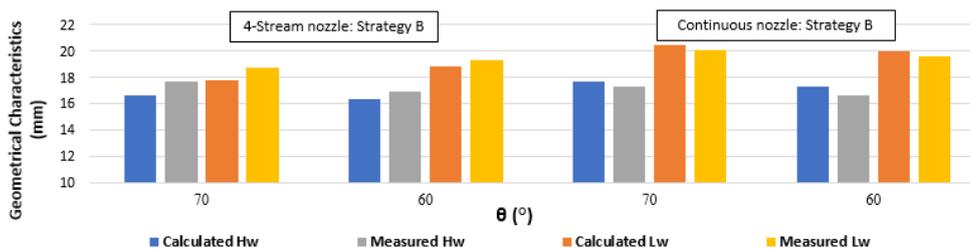


Figura III-74. Comparación de las dimensiones de la altura (H_w) y longitud de la pared (L_w) a $900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

La principal conclusión que se obtiene de este estudio es que la estrategia y el tipo de boquilla definen el desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX) que se puede alcanzar para obtener paredes inclinadas sin distorsiones. Como el ángulo de la pared (θ) y ΔX definen la altura de la capa, también definen la cantidad de material necesario por capa. Como consecuencia es necesario seleccionar la geometría de cordón individual de acuerdo con estos parámetros. Además, la boquilla coaxial continua permite solo un mínimo desplazamiento horizontal entre capas para obtener paredes sin defectos lo cual limita su uso para fabricar paredes inclinadas con ángulos no inferiores de 80° empleando la Estrategia B. Se recomienda emplear la boquilla coaxial continua en equipos con mesa inclinable o en aporte sobre sustrato horizontal en equipos de baja potencia y MDR.

4.4 Estructura y propiedades mecánicas del Inconel 718 aportado por láser

4.4.1 Propiedades mecánicas

Con el objetivo de evaluar las propiedades mecánicas de la pared fabricada por aporte láser, se ha fabricado una pared de $180 \times 120 \times 6$ mm con los parámetros de la Tabla III-21.

Tabla III-21. Parámetros de fabricación de la pared por aditivo.

P (W)	v (mm·min ⁻¹)	\dot{m}_p (g·min ⁻¹)	d _o (%)
2500	500	20	50

De esta pared se han extraído 6 probetas de tracción con una sección de $4 \times 4,2$ mm en diferentes posiciones y direcciones para evaluar la anisotropía del material (Figura III-75.a).

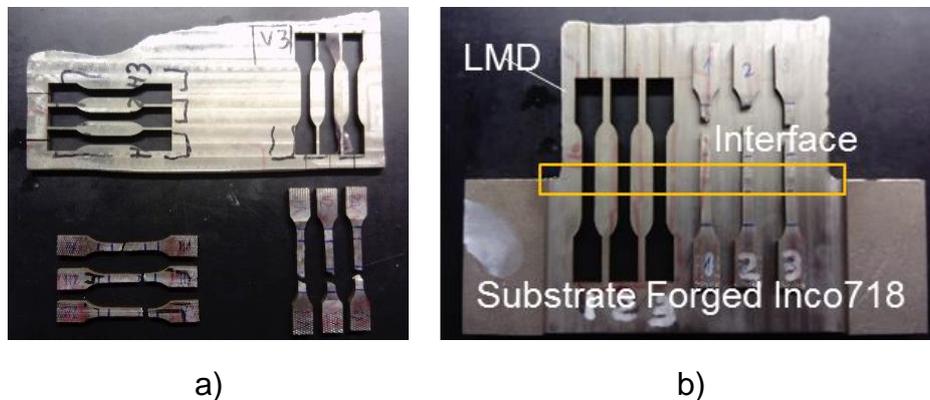


Figura III-75. Probetas de tracción extraídas de las paredes: a) Probetas fabricadas en dirección horizontal y vertical dentro de la pared; b) Probetas para evaluar la zona de unión entre sustrato y pared.

Además, para la evaluación de la unión entre el material aportado y el sustrato, también se ha fabricado una pared de 120 × 70 × 6 mm utilizando un sustrato de 70 mm de espesor, a partir del cual se extrajeron otras 3 probetas de tracción con una sección de 5 × 4 mm (Figura III-75.b).

Los resultados se muestran en la Figura III-76. La anisotropía del material según la dirección de la probeta es mínima. De hecho, la mayor variación observada para las propiedades mecánicas estudiadas ha estado siempre por debajo del 10%. Por otro lado, las propiedades mecánicas del material forjado (según los datos técnicos proporcionados por el fabricante) son un límite elástico (0,2%) de 430MPa, una resistencia a la tracción de 869MPa y un alargamiento del 54,5%. Los valores de límite elástico y resistencia a la tracción son comparables a los proporcionados por las probetas extraídas de la pared. Sin embargo, el alargamiento a la fractura es mucho mayor en la pieza forjada.

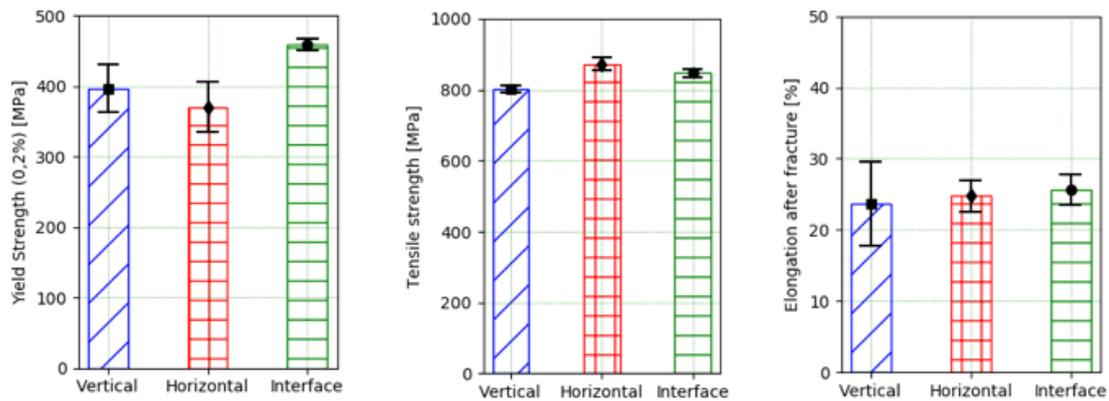


Figura III-76. Propiedades mecánicas de la pared aportada por láser. En azul las propiedades en la dirección vertical; En rojo las propiedades en dirección horizontal; En verde las propiedades de la zona de unión entre sustrato y pared.

4.4.2 Estructura y dureza

Se han fabricado dos paredes diferentes: una fabricada por aditivo (mismos parámetros que en la Tabla III-21) y otra mecanizando una placa de la misma aleación producida mediante forja convencional con tratamiento térmico de solubilización y recocido. Ambas con unas dimensiones de 6 mm de espesor, 22,2 mm de altura y 52 mm de longitud (Figura III-77).

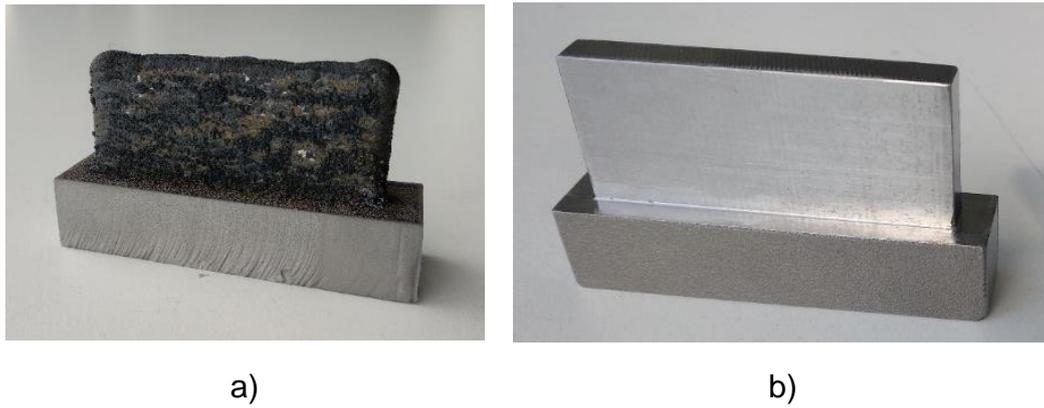


Figura III-77. Paredes fabricadas: a) Aporte por láser; b) Mecanizando material forjado.

Ambas paredes se han mecanizado, cortado, rectificado, pulido y atacado con una solución de ácido oxídico para medir la dureza y analizar la microestructura metálica. En la Figura III-78 se muestran los perfiles de dureza tanto de la pared forjada como de la fabricada por DED.

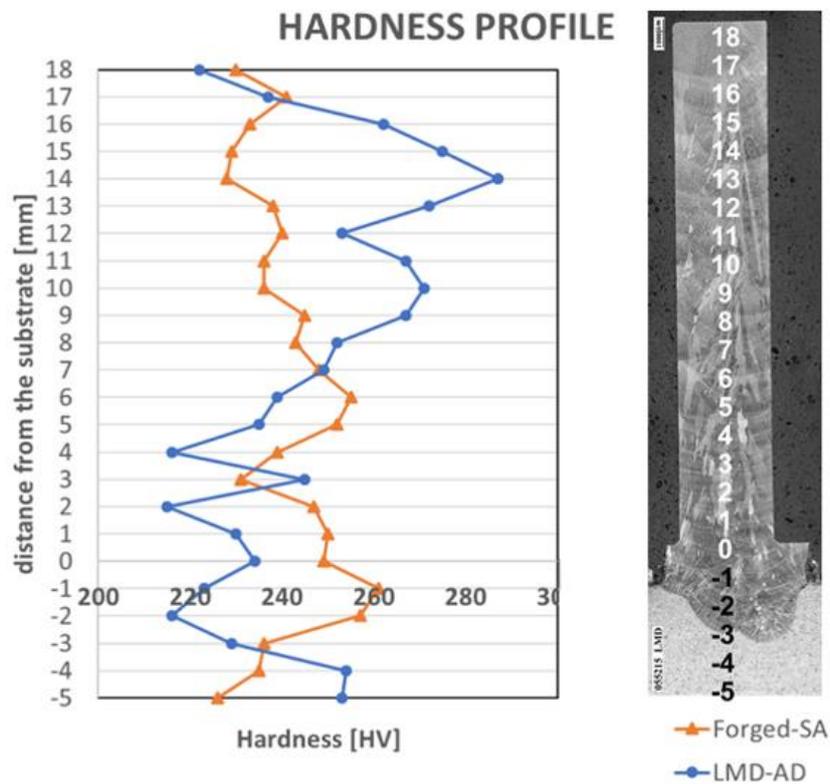


Figura III-78. Perfil de durezas de las paredes.

Los valores de la dureza que corresponden a la zona mecanizada son aquellas entre 1 mm y 18 mm sobre el sustrato. Los resultados muestran que el valor medio de la zona mecanizada es de 231,6 HV en el caso de la pared forjada y de 251,8 HV en el caso de la pared DED. Además, se observa una menor variación de la dureza a lo largo de la altura de la pared en la pared forjada. En este caso, la desviación más alta del valor medio de la dureza es inferior al 7%,

mientras que en la pared fabricada por aporte láser es del 14%. Esto ocurre debido a que en la fabricación de cada capa de la pared DED, el aporte de calor del láser actúa de manera similar a un tratamiento térmico, afectando así a la estructura del material, crecimiento de grano y dureza.

La Figura III-79 muestra la microestructura de la pared DED. En el lado izquierdo de la imagen se muestran dos macrográficas de la pieza en los planos XZ e YZ de la pared y, en el lado derecho, se muestra la microestructura del Inconel 718. En las micrográficas se observan largos granos columnares de varios milímetros que están relacionados con la carga calorífica y las direcciones de enfriamiento. El análisis de la microestructura también revela la presencia de una estructura de dendritas celulares con dendritas columnares y dendritas finas. En la Figura III-80 se muestra la microestructura de la pared producida por forja. En este caso, se observan los típicos granos equiaxiales con un tamaño de grano de ASTM-7. También se nota el alargamiento de los granos (producido por la deformación plástica inducida en el proceso de forja).

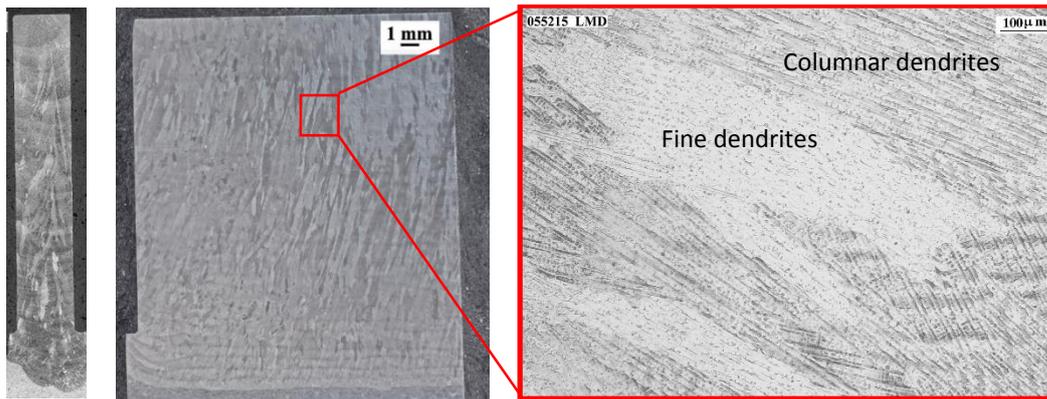


Figura III-79. Macrografía y microestructura de la pared fabricada por aporte láser.

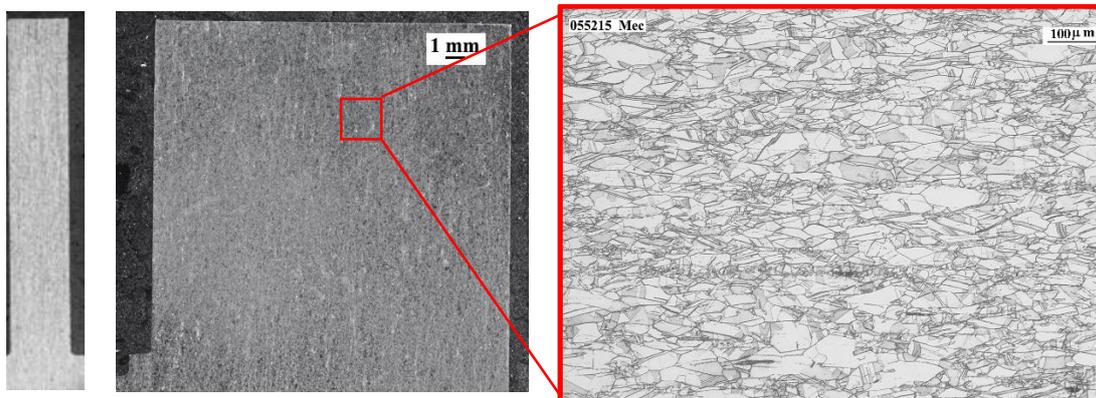


Figura III-80. Macrografía y microestructura de la pared forjada.

Esto explica las mayores fuerzas de corte y momento flector durante el mecanizado de la pared DED [Ostra, 2019] ya que una microestructura columnar

con mayor tamaño de grano produce una menor maquinabilidad y la dureza del material aportado fue un 10% mayor que en el caso forjado.

5 Conclusiones

El estudio experimental realizado en este capítulo sirve como base para el desarrollo del modelo geométrico y de las estrategias que se describen en el Capítulo IV y que se validan en el Capítulo V. Las principales conclusiones obtenidas de todo el trabajo realizado en el estudio experimental son:

- El sensor FLOWWatch es adecuado para la monitorización y control del flujo másico de polvo con el fin de obtener un flujo estable y concreto durante el proceso de aporte.
- El tiempo de espera mínimo necesario al inicio de la alimentación del flujo de polvo hasta obtener un flujo estable es de 22,4 segundos.
- La distancia de trabajo óptima es de 14,5 mm con la boquilla coaxial discreta de 4 vías y 11,5 mm con la boquilla coaxial continua. A esa distancia la concentración del polvo inyectado es máxima y su distribución puede considerarse circular.
- La boquilla coaxial continua de 0,5 mm es superior en eficiencia, MDR y productividad a la boquilla coaxial discreta de 4 vías y presenta una menor dilución por lo que es la recomendada para aportar material con el cabezal vertical sobre sustrato horizontal. Con este cabezal, dentro del rango estudiado, se puede obtener una dilución mínima del 36%, una eficiencia del 90%, un MDR de $1,04 \text{ Kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y una productividad de hasta $4000 \text{ mm}^2\cdot\text{min}^{-1}$. Por el contrario, con la boquilla discreta de 4 vías se puede obtener una dilución mínima del 53%, una eficiencia del 64%, un MDR de $0,75 \text{ Kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y una productividad de hasta $3600 \text{ mm}^2\cdot\text{min}^{-1}$.
- La sección transversal del cordón individual es más parecida a una parábola de segundo grado con valores de área menores de 3 mm^2 y más una forma intermedia entre parábola y elipse con valores superiores tanto para la boquilla coaxial continua de 0,5 mm como para la boquilla discreta de 4 vías.
- La sección transversal del área de la zona de la dilución del cordón individual es más parecida a una parábola de segundo grado con valores de área menores de $3,5 \text{ mm}^2$ y más una forma intermedia entre parábola y elipse con valores superiores para la boquilla discreta de 4 vías. En el caso de la boquilla coaxial continua de 0,5 mm, la forma es más parecida a una parábola de segundo grado con valores de área menores de 3 mm^2 y más una forma intermedia entre parábola y elipse con valores superiores.
- La boquilla discreta de 4 vías es la opción más eficiente en las aplicaciones donde hay que inclinar el cabezal láser. En el caso de la boquilla coaxial

continua, los efectos gravitacionales que sufre el flujo de polvo desde la cámara de expansión hasta la boquilla cambian su distribución funcionando más como una boquilla lateral con alta divergencia, causando una distribución dispersa del polvo en el baño fundido y reduciendo drásticamente su eficiencia. Por lo tanto, se descarta el uso de la boquilla coaxial continua siempre que se deba inclinar el cabezal.

- La proyección elíptica del spot láser en el sustrato, que se obtiene tanto inclinando el sustrato como inclinando el cabezal láser, aumenta el baño fundido y altera las dimensiones del cordón aportado. Este efecto se debe tener en cuenta al fabricar paredes ya que alteran las dimensiones finales obteniendo paredes más cortas y anchas cuanto mayor es la inclinación.
- La estrategia y el tipo de boquilla definen el desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX) que se puede alcanzar para obtener paredes inclinadas sin distorsiones. Como el ángulo de la pared (θ) y ΔX definen la altura de la capa, también definen la cantidad de material que se debe aportar por capa. Por lo que es necesario seleccionar la geometría de cordón individual de acuerdo con estos parámetros. Además, la boquilla coaxial continua permite solo un mínimo desplazamiento horizontal entre capas para obtener paredes sin defectos lo cual limita su uso para fabricar paredes inclinadas a equipos con mesa inclinable o en aporte sobre sustrato horizontal en equipos de baja potencia y MDR.
- La estructura obtenida mediante aporte láser presenta una mínima anisotropía de las propiedades mecánicas, por debajo del 10%, con valores de límite elástico y resistencia a la tracción comparables a los del mismo material forjado, aunque con un aumento en un 10% de la dureza. Sin embargo, el alargamiento a la fractura es mucho menor que con el mismo material forjado.
- La microestructura obtenida en las paredes fabricadas por aporte láser presenta largos granos columnares con presencia de estructuras de dendritas celulares con dendritas columnares y dendritas finas.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE UN MODELO GEOMÉTRICO Y ESTRATEGIAS PARA EL APORTE DE GEOMETRÍAS DE SECCIÓN VARIABLE

1 Introducción

Como se ha comentado en el estado del arte, para obtener una estimación de la geometría final obtenida mediante el proceso aditivo, numerosos autores recurren a modelos tanto numéricos como empíricos para estimar las dimensiones y características del material aportado. Estos modelos buscan reducir el número de pruebas experimentales para optimizar los parámetros del proceso. Sin embargo, debido a que se desconoce la importancia de algunas interacciones entre parámetros estos modelos pueden no resultar efectivos.

En el caso de los modelos numéricos, el coste computacional de una simulación completa es todavía excesivo y únicamente asumible para casos simples como es el de un único cordón o un recubrimiento de un área reducida. Por otro lado, los modelos geométricos empíricos son más limitados que los numéricos en cuanto a la información que pueden dar sobre las características del material aportado y no existe un modelo para estructuras multicapa.

Por otro lado, la estrategia de aporte es un tema de estudio en el proceso DED que depende en gran medida de la configuración cinemática de la máquina y del tipo de boquilla. Aunque hoy en día existen módulos específicos en varios softwares CAM para el proceso de fabricación aditiva, su efectividad no está clara. Dependiendo de la complejidad de la geometría, es necesario desarrollar un programa CAM para adecuar la trayectoria a “las reglas y monitorización” de cada sistema de fabricación aditiva [Garmendia, 2018]. Además, la estrategia de aporte es fundamental para obtener una buena geometría [Kono, 2018].

Este capítulo presenta un modelo predictivo que estima la geometría de las capas fabricadas mediante aporte láser y que es capaz de considerar tanto el caso de una capa como multicapa. Así, el modelo se puede emplear para definir tanto pautas como estrategias de fabricación para estructuras multicapa basándose en los resultados estimados. Este modelo obtiene como datos de salida tanto la geometría del recubrimiento como el área de la dilución del sustrato tomando en cuenta diferentes parámetros de entrada. Además, permite definir la estrategia de fabricación de estructuras multicapa tanto de sección constante como variable teniendo en cuenta la configuración cinemática de la máquina híbrida y el tipo de boquilla empleada.

Partiendo de los resultados obtenidos en el estudio experimental del Capítulo III, el modelo calcula la sección transversal del recubrimiento aportado a partir de las características del cordón individual (altura, anchura, área y penetración), el porcentaje de solapamiento y el ángulo de inclinación. Como resultado, se obtiene la sección transversal tanto de la geometría del recubrimiento como de la dilución en el sustrato. Los resultados permiten definir una estrategia de aporte con cordones extras en los extremos de la geometría y con un valor variable tanto del número de cordones como del porcentaje de solapamiento en cada capa para adaptaciones geométricas al perfil de la estructura. Esto permite fabricar estructuras multicapa de espesor variable, las cuales, son necesarias al fabricar o reparar geometrías complejas.

Así, en primer lugar, se ha desarrollado un modelo para recubrimientos de una capa que es capaz de predecir la geometría del área aportada y la dilución con el sustrato. Este modelo se ha validado aportando Inconel 718. Además, con el fin de mostrar su eficacia con otros materiales, también se ha validado aportando Euroloy 16606A.04, un material base hierro ampliamente utilizado en aplicaciones de recubrimiento.

En segundo lugar, se ha definido la estrategia de aporte en el caso de la fabricación de estructuras multicapa de sección constante empleando para ello los resultados del modelo geométrico para recubrimientos de una capa. Esta estrategia consiste en aportar cordones extras en los extremos de la geometría, y se ha validado mediante la fabricación de paredes rectas.

Por último, se ha definido la estrategia de aporte en el caso de la fabricación de estructuras multicapa de sección variable empleando también para ello los resultados del modelo geométrico para recubrimientos de una capa. Esta estrategia también aporta cordones extras en los extremos de la geometría, pero presenta un algoritmo para adaptaciones geométricas al perfil de la estructura. Se ha validado la estrategia mediante la fabricación de distintas paredes de sección variable.

2 Desarrollo del modelo para recubrimientos de una capa

El modelo geométrico propuesto predice tanto la geometría del recubrimiento como la dilución con el sustrato. La geometría del material aportado se basa en el modelo desarrollado por Ocelík et al. [Ocelík, 2014], suponiendo que cada nuevo cordón aportado en el recubrimiento asume la forma de una parábola de segundo grado. Este modelo logra un alto nivel de precisión teniendo en cuenta solamente parámetros puramente geométricos, como las características del

cordón simple (Figura IV-1) y el porcentaje de solapamiento (d_0) del recubrimiento, aunque no aporta ningún modelo de la dilución en el sustrato.

Por este motivo, el modelo que se ha desarrollado en este capítulo obtiene el área de la dilución del recubrimiento con el sustrato a partir de los resultados experimentales de trabajos anteriores. El modelo emplea las características del cordón simple definidas en el Capítulo III para el análisis experimental. En concreto se emplean la altura, anchura y sección del cordón, así como la profundidad de la dilución (h , w , A y p) como datos de entrada (Figura IV-1.b) y supone que el recubrimiento (Figura IV-2.a) es la suma de los cordones aportados a una distancia de solapamiento fija entre ellos. El modelo fue desarrollado para predecir la sección transversal de un recubrimiento fabricado con la estrategia de zig-zag perpendicular a la dirección de avance del recubrimiento (Figura IV-2.b).

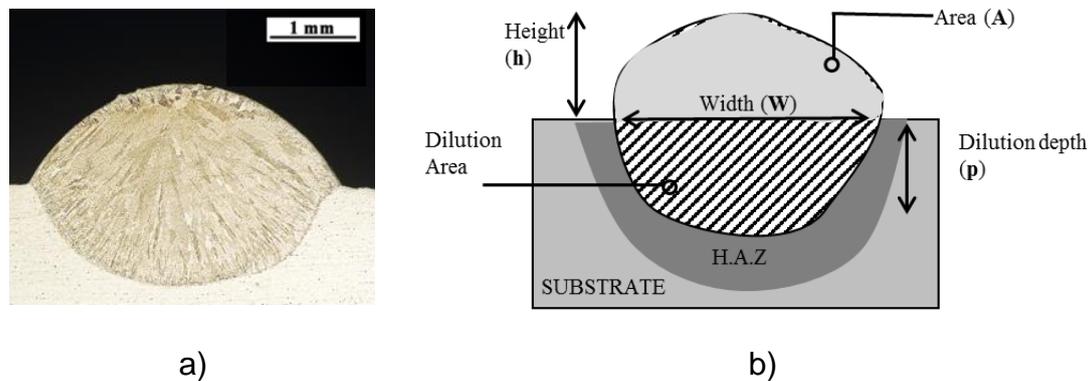


Figura IV-1. Cordón individual: a) Macrofotografía de la sección transversal de un cordón individual; b) Esquema de las características del cordón individual.

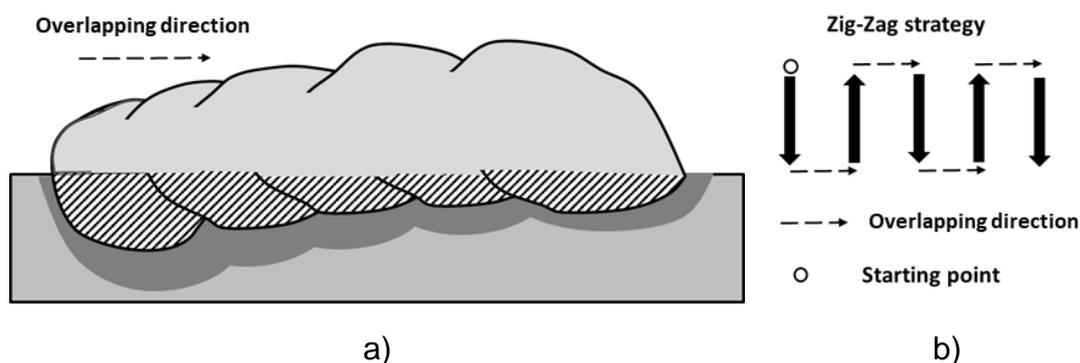


Figura IV-2. Recubrimiento depositado con la estrategia en zig-zag: a) Esquema de la sección transversal resultante; b) Esquema de la estrategia en Zig-zag.

Partiendo de un cordón inicial i (Figura IV-3.a), cuyas características geométricas son conocidas, el modelo asume que el nuevo cordón aportado solapando el cordón i es una suma geométrica de secciones (2D) y no contempla desplazamiento de material ni lateral ni longitudinal. La sección del nuevo cordón

$i+1$ mantiene el mismo área que el cordón simple (Figura IV-3b) al ser aportado con los mismos parámetros que este (misma potencia, avance, etc.). Este nuevo cordón acaba formando con el área solapada del cordón anterior i (Figura IV-3.c) un nuevo cordón $i+1$ con la forma de una parábola de segundo grado con una anchura w_{i+1} . Por lo tanto, debido a que el modelo asume una suma geométrica de secciones y que no hay desplazamiento de material ni lateral ni longitudinal, se deben tener en cuenta 4 suposiciones geométricas para resolver el modelo (Figura IV-3.d):

1. La altura Y_i en el punto P es la misma en ambos cordones.
2. El área desde el origen del nuevo cordón O_{i+1} a P (A') es la suma del área del cordón simple (A) más el área solapada (A_o) del cordón i anterior. Como ya se ha comentado, las características del cordón i son conocidas así que se puede calcular el área solapada (A_o).
3. La distancia desde el origen O_{i+1} a P es la misma que la anchura del cordón simple (w).
4. La distancia desde el origen del nuevo cordón O_{i+1} al anterior O_i es la distancia de solapamiento de la anchura del cordón individual D_o .

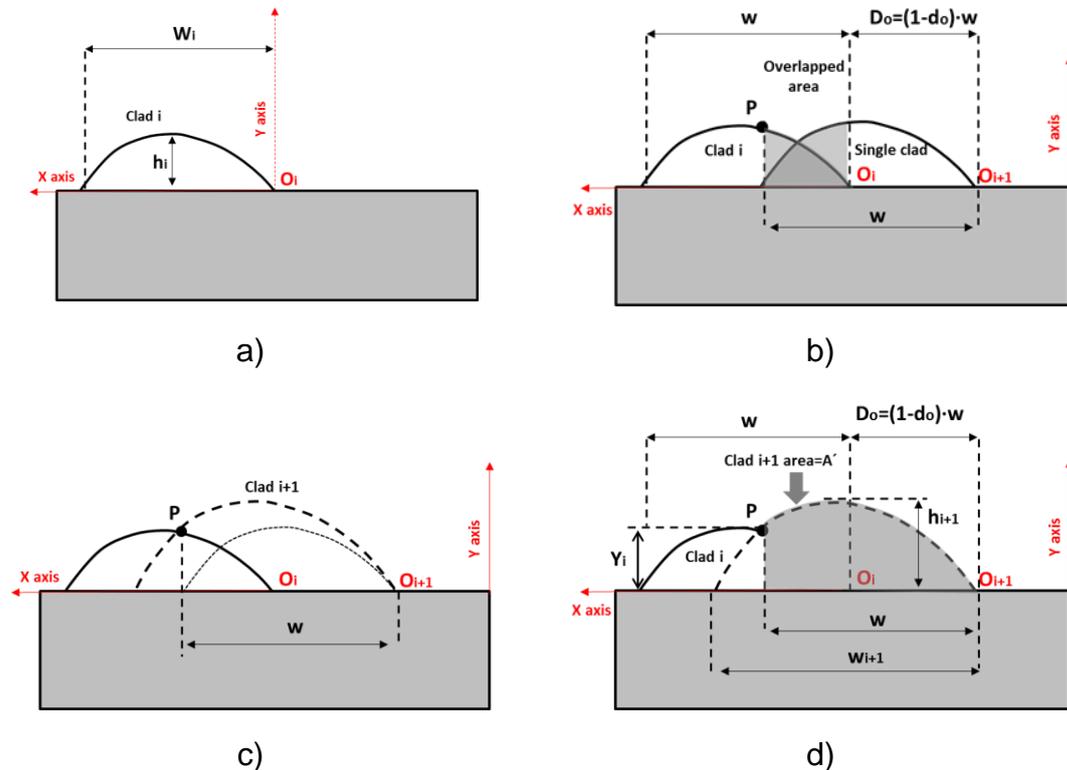


Figura IV-3. Modelo geométrico: a) cordón inicial i ; b) nuevo cordón $i+1$ aportado solapando el anterior cordón i ; c) geometría de parábola de segundo grado del cordón $i+1$ al sumar el área solapada y la aportada; d) características finales del cordón $i+1$.

Las Ecuaciones 44 y 45 se resuelven para definir las características del cordón i con respecto al origen O_i , y las ecuaciones 46 y 47, para establecer la geometría del nuevo cordón ($i + 1$) con respecto al origen O_{i+1} . Las ecuaciones 48 a 56 se resuelven para obtener las características del cordón $i + 1$ a partir de las características del cordón simple y de las características del cordón i , y poder comenzar una nueva iteración. Las ecuaciones de la parábola de segundo grado se han obtenido respecto de los orígenes O_{i+1} y O_i en lugar del eje de simetría del cordón, porque la resolución de las ecuaciones es más simple. En la primera iteración, el cordón i es el cordón individual.

$$Y_i = a_i \cdot x^2 + b_i \cdot x \quad \text{Eq. 44} \quad A_i = \frac{a_i \cdot x^3}{3} + \frac{b_i \cdot x^2}{2} \quad \text{Eq. 45}$$

$$Y_{i+1} = a_{i+1} \cdot x^2 + b_{i+1} \cdot x \quad \text{Eq. 46} \quad A_{i+1} = \frac{a_{i+1} \cdot x^3}{3} + \frac{b_{i+1} \cdot x^2}{2} \quad \text{Eq. 47}$$

$$a_i = -\left(\frac{4 \cdot h_i}{w_i^2}\right) \quad \text{Eq. 48} \quad b_i = \frac{4 \cdot h_i}{w_i} \quad \text{Eq. 49}$$

$$Y_i = a_i \cdot (d_o \cdot w)^2 + b_i \cdot (d_o \cdot w) = a_{i+1} \cdot w^2 + b_{i+1} \cdot w \quad \text{Eq. 50}$$

$$A' = A_o + A = \frac{a_{i+1} \cdot w^3}{3} + \frac{b_{i+1} \cdot w^2}{2} \quad \text{Eq. 51}$$

$$A_o = \frac{a_i \cdot (d_o \cdot w)^3}{3} + \frac{b_i \cdot (d_o \cdot w)^2}{2} \quad \text{Eq. 52}$$

$$a_{i+1} = 3 \cdot \left(\frac{A'}{w^3} - \frac{b_{i+1}}{2 \cdot w}\right) = -\left(\frac{4 \cdot h_{i+1}}{w_{i+1}^2}\right) \quad \text{Eq. 53}$$

$$b_{i+1} = 2 \cdot \left(\frac{3 \cdot A'}{w^2} - \frac{Y_i}{w}\right) = \left(\frac{4 \cdot h_{i+1}}{w_{i+1}}\right) \quad \text{Eq. 54}$$

$$h_{i+1} = -\left(\frac{b_{i+1}^2}{4 \cdot a_{i+1}}\right) \quad \text{Eq. 55} \quad w_{i+1} = -\left(\frac{b_{i+1}}{a_{i+1}}\right) \quad \text{Eq. 56}$$

La resolución de la altura y la anchura del cordón $i + 1$ (Eq. 55 y 56) es el punto de partida para otra iteración. El espesor efectivo del recubrimiento, es decir el espesor para obtener un recubrimiento de espesor constante después del mecanizado, se define por el menor espesor calculado por el modelo. Así pues, este corresponde al menor valor de Y_i obtenido en el punto P (Figura IV-3.d) de todos los cordones calculados que forman el recubrimiento. La altura de cada cordón solapado del recubrimiento puede considerarse la referencia para la trayectoria del proceso de mecanizado.

Para completar el modelo, se simplifica la dilución real del recubrimiento (Figura IV-4.a) a una parábola de segundo grado sobre el sustrato (Figura IV-4.b) con la misma anchura que el cordón simple. Asimismo, se asume que la suma de la altura y la penetración permanece constante en todos los cordones que forman parte del recubrimiento (Eq.57). Por tanto, cualquier aumento en el porcentaje de solapamiento reduce la dilución, porque aumenta la cantidad de material solapado, y por tanto, aumenta la altura del cordón. Esto es lógico porque una parte de la energía que se empleaba en fundir el sustrato en el caso del cordón simple es utilizada en fundir el material solapado. Esta suposición es un valor constante simplificado del balance energético entre el material depositado y el sustrato fundido [Chakraborty, 2019]. Esta relación se obtuvo analizando todos los recubrimientos fabricados en trabajos anteriores con diferentes boquillas, polvos metálicos y sustratos [Ramiro, 2018-a] [Ramiro, 2018-b] [Ramiro, 2018-c].

$$h_i + p_i = h_{i+1} + p_{i+1} \quad \text{Eq. 57}$$

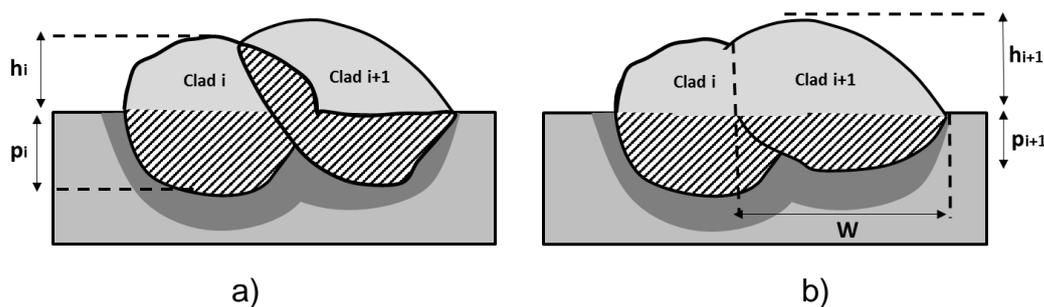


Figura IV-4. Esquema de la dilución en el nuevo cordón $i+1$: a) Real; b) Modelo.

Tanto la caracterización de las características geométricas del cordón simple en función de los parámetros principales para el Inconel 718 como el estudio de la evolución de las características geométricas con la inclinación del cabezal y del sustrato (ambos dentro de los estudios experimentales del Capítulo III) permiten optimizar este modelo para dicho material. Mediante las ecuaciones obtenidas (Eq.4 a 33) es posible obtener las características geométricas en función de la potencia, velocidad de avance, flujo másico de polvo e inclinación del cabezal o del sustrato. Esto permite ajustar los parámetros para obtener unas características concretas (dilución, ondulación o espesor de capa) dentro del rango estudiado obteniendo múltiples soluciones de forma rápida y sencilla.

2.1 Validación en Inconel 718

En esta validación se ha comprobado la precisión del modelo y de las ecuaciones obtenidas en la caracterización del proceso de aporte del estudio experimental comparando la sección real con la calculada por el modelo partiendo de los parámetros principales del proceso y no de las características geométricas del cordón individual.

Para validar el modelo con Inconel 718 con la boquilla coaxial discreta de 4 vías, se han fabricado tres recubrimientos empleando distintos parámetros del proceso (Tabla IV-1). Mediante las ecuaciones antes mencionadas se han calculado las características del cordón individual que necesita el modelo como datos de entrada (Tabla IV-2). Cada recubrimiento se ha fabricado solapando 8 cordones y la sección transversal ha sido comparada con la obtenida por el modelo para obtener el error máximo con la sección real.

La distancia de trabajo ha sido de 14,5 mm y se ha empleado Argón como gas de protección y arrastre con un flujo de 4,5 and 17 L·min⁻¹ respectivamente.

Tabla IV-1. Parámetros principales del proceso de fabricación de los recubrimientos.

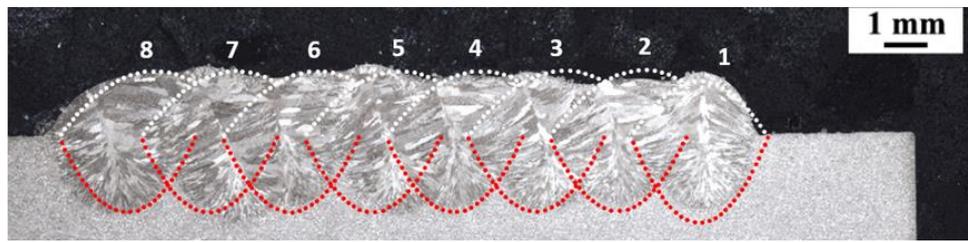
Parámetros del Proceso	Recubrimiento 1	Recubrimiento 2	Recubrimiento 3
P (W)	2500	1900	2300
v (mm·min⁻¹)	500	900	700
m_p (g·mm⁻¹)	18	18	18
d_o (%)	40	50	60

Tabla IV-2. Características del cordón individual que forma cada recubrimiento calculadas mediante el modelo para la boquilla discreta de 4 vías.

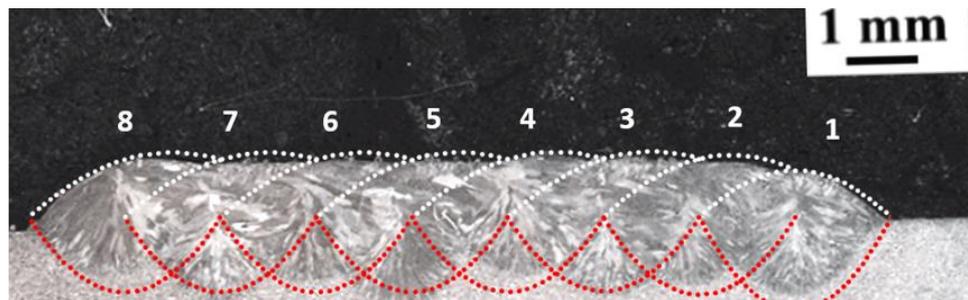
Características del cordón individual según el modelo	Recubrimiento 1	Recubrimiento 2	Recubrimiento 3
h (mm)	1,22	0,63	0,88
w (mm)	3,22	2,72	2,90
A (mm²)	2,63	1,15	1,68
p (mm)	1,88	1,25	1,61

Las dimensiones obtenidas con el modelo presentan una buena aproximación a las dimensiones reales en los tres casos (Figura IV-5). La desviación máxima se ha obtenido en el recubrimiento 1 con una diferencia de espesor de 0,14 mm y

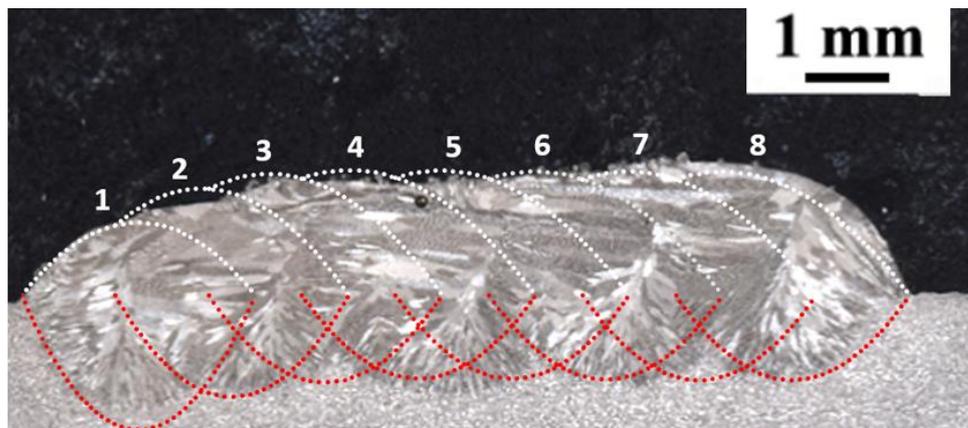
una diferencia con la profundidad de la dilución de 0,3 mm. La Tabla IV-3 muestra las desviaciones máximas obtenidas en cada recubrimiento.



a)



b)



c)

Figura IV-5. Sección transversal comparada con la obtenida por el modelo. El material aportado y la dilución calculada por el modelo se muestran con las líneas blanca y roja discontinua respectivamente: a) Recubrimiento 1; b) Recubrimiento 2; c) Recubrimiento 3.

Tabla IV-3. Desviación máxima del espesor y dilución del modelo respecto a la sección real.

Características del recubrimiento	Recubrimiento 1	Recubrimiento 2	Recubrimiento 3
Espesor	0,14	0,1	0,13
Dilución	0,3	0,25	0,19

Los valores de las desviaciones máximas se encuentran dentro de la variabilidad del proceso de aporte láser y deben ser tenidas en cuenta a la hora de definir el sobreespesor necesario para asegurar el espesor de capa requerido. En cualquier caso, y a la vista de la validación realizada, se considera que el modelo presenta una aproximación válida y dentro de los márgenes de error del proceso de aporte para la mayoría de los casos industriales. Así, se considera que el modelo puede ser empleado para estimar las características geométricas de los recubrimientos fabricados mediante el proceso de aporte.

2.2 Validación en otros materiales

Una de las aplicaciones del aporte láser es la de recubrir componentes sujetos a desgaste para aumentar la vida útil de dicho componente o recuperarlo tras sufrir desgaste durante su uso. Esta opción es de gran interés en sectores como el de moldes y matrices y permite ahorrar costes ya que el recubrimiento fabricado es el que tiene que soportar el desgaste permitiendo que el sustrato sea un material más corriente de propiedades inferiores y ampliando la vida útil del componente. En estas aplicaciones es útil disponer de un modelo geométrico que obtenga las características del recubrimiento.

En trabajos previos [Ramiro, 2018-a] [Ramiro, 2018-b] [Ramiro, 2018-c] se han estudiado diferentes materiales para el recubrimiento de un husillo extrusor sometido a desgaste con el fin de aumentar su vida útil. Las secciones transversales de los recubrimientos obtenidos en estos trabajos pueden ser comparados con el modelo geométrico. Esto permite validar el modelo en otros materiales y ampliar su campo de uso.

2.2.1 Materiales

Una vez realizada la validación en Inconel 718, aleación empleada para el desarrollo de la metodología propuesta en este trabajo, se ha considerado la validación del modelo en otros materiales. Así, el modelo ha sido validado sobre otros materiales empleados en recubrimientos antidesgaste. En concreto, se ha realizado una validación sobre recubrimientos de Eutroloy 16606A.04 aportado sobre sustrato de acero 42CrMoS4 empleando distintas boquillas y parámetros de proceso. La composición química de ambos materiales se muestra en la Tabla IV-4. El Eutroloy 16606A.04 es un acero aleado martensítico con una alta resistencia al desgaste por abrasión incluso bajo altas temperaturas combinadas con cargas de fatiga. Por su parte el sustrato es de acero aleado 42CrMoS4. Este material es un acero estructural especial, que se utiliza principalmente en la industria de tornillos de extrusión, husillos, cigüeñales, etc. y muchas otras piezas que necesitan soportar cargas moderadas y altas.

Tabla IV-4. Composición química del polvo y el sustrato (wt. %).

	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V
Polvo	80,8	0,86	0,31	0,31	4,60	4,90	6,50	1,70
Sustrato	97,3	0,40	0,31	0,76	1,04	0,16	-	-

2.2.2 Validación de los recubrimientos

Al igual que con el Inconel 718, se han escogido 3 recubrimientos para la validación. Los recubrimientos 1 y 3 se han fabricado con una boquilla coaxial continua de ranura de 1 mm y el recubrimiento 2 con una boquilla coaxial continua con ranura de 0,5 mm. Los parámetros del proceso, así como las características del cordón individual que componen cada recubrimiento están en la Tabla IV-5 y Tabla IV-6.

Tabla IV-5. Parámetros principales del proceso de fabricación de los recubrimientos.

Parámetros del Proceso	Recubrimiento 1	Recubrimiento 2	Recubrimiento 3
P (W)	2700	2100	2700
v (mm·min⁻¹)	900	500	500
m_p (g·mm⁻¹)	15,6	12,3	15,6
d_o (%)	40	50	50

Tabla IV-6. Características del cordón individual que forma cada recubrimiento.

Características	Recubrimiento 1	Recubrimiento 2	Recubrimiento 3
h (mm)	0,72	1,19	1,06
w (mm)	3,11	2,41	3,48
A (mm²)	1,38	2,19	2,71
p (mm)	0,71	0,76	0,97

Igual que con el Inconel 718, el modelo obtiene una buena aproximación a la geometría del recubrimiento real (Figura IV-6) con una desviación máxima similar a la obtenida con el Inconel 718.

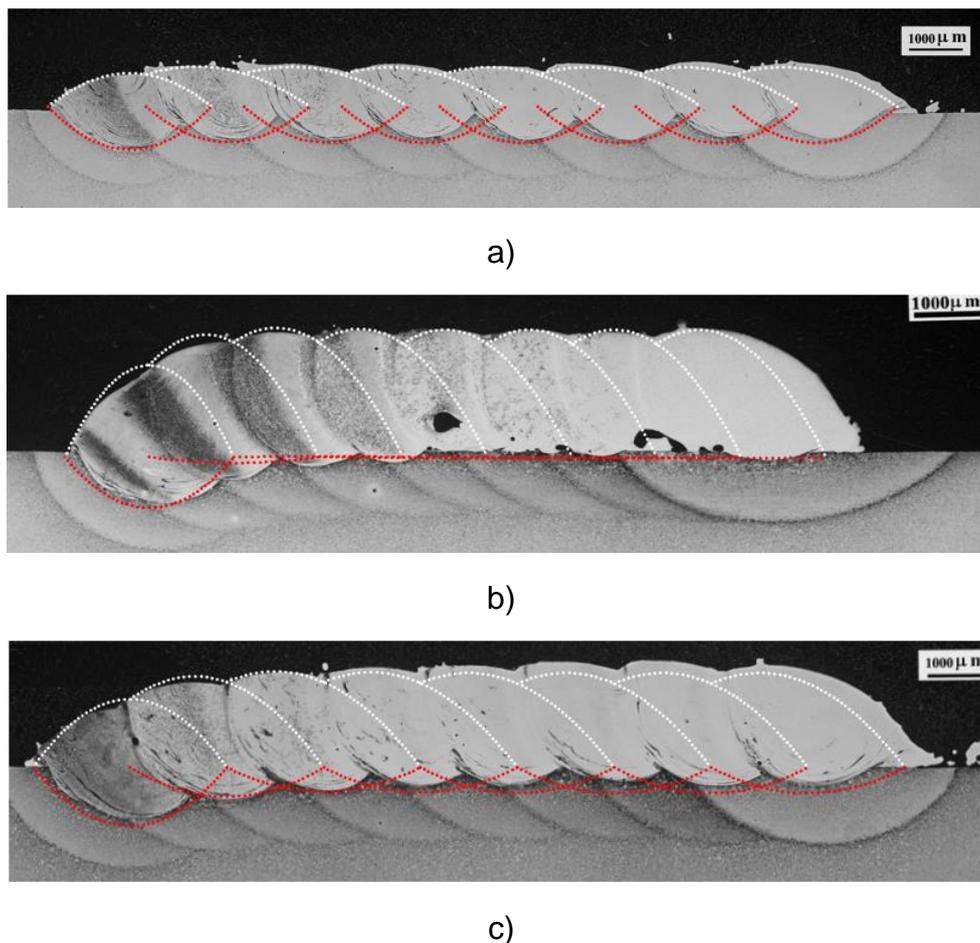
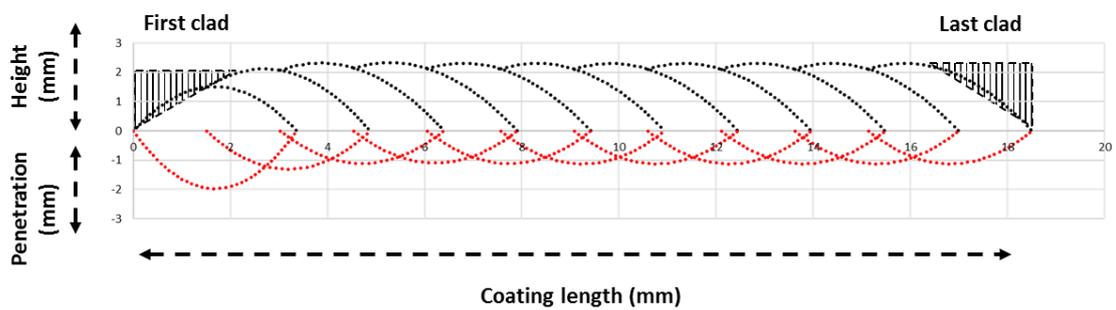


Figura IV-6. Comparación del modelo con las secciones transversales de recubrimientos de Eutroloy 16606A.04. El material aportado y la dilución calculada por el modelo se muestran con las líneas blanca y roja discontinua respectivamente: a) Recubrimiento 1; b) Recubrimiento 2; c) Recubrimiento 3.

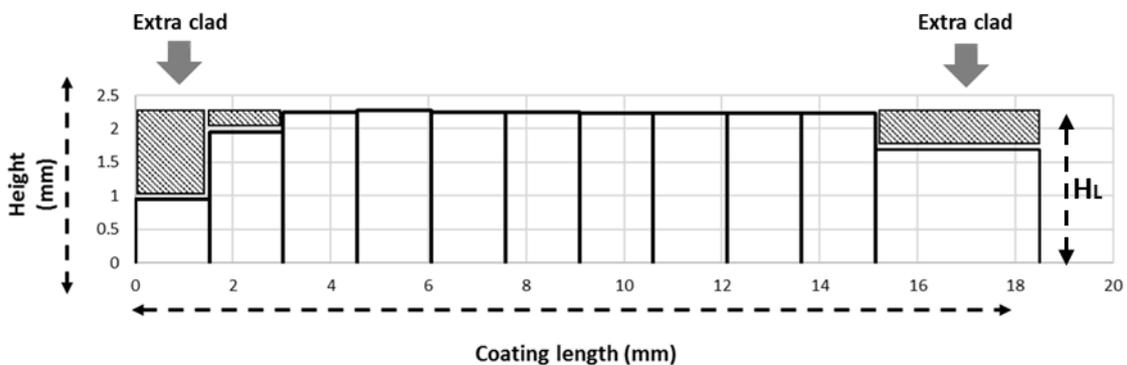
Además, el modelo demuestra que puede determinar condiciones de aporte que producen faltas de fusión con el sustrato como es el caso del recubrimiento 2 (Figura IV-6.b). Como ya se ha explicado, el modelo asume que la suma de la altura y penetración se mantienen constantes en todos los cordones del recubrimiento por lo que a mayor altura que alcance el cordón menor será su dilución. Esto es debido a que la altura que alcanza el cordón depende del área solapada del cordón anterior, por lo que será mayor cuanto mayor sea el solapamiento. Sin embargo, aunque aumenta la altura, la energía empleada en fundir el sustrato se reduce al aumentar el solapamiento ya que es empleada en refundir el área solapada del cordón anterior. Esto reduce la dilución con el sustrato pudiendo provocar una falta de fusión si el solapamiento resulta excesivo para las condiciones empleadas en el proceso de aporte. Por lo que el modelo se puede emplear para determinar qué porcentaje de solapamiento es crítico con las condiciones de aporte del proceso.

3 Aporte en estructura multicapa

Al fabricar una estructura multicapa, un aspecto relevante a tener en cuenta es que el espesor del recubrimiento que forma cada capa aumenta desde el primer cordón que lo forma hasta que alcanza un espesor constante. Además, el último cordón del recubrimiento presenta una curva pronunciada desde la parte superior hasta el sustrato. Ambas situaciones generan una falta de material que acaba produciendo una distorsión en los bordes (Figura IV-7.a) que aumenta a mayor número de capas.



a)



b)

Figura IV-7. Falta de material calculada por el modelo en los bordes del recubrimiento: a) Modelo con forma de parábola de segundo grado; b) Aproximación suponiendo bloques rectangulares.

Por lo tanto, una posible solución para compensar esta falta de material es agregar cordones adicionales en los bordes de la capa. En este sentido, el modelo geométrico se puede utilizar para predecir esta falta de material y el área necesaria en los bordes de la capa para obtener un crecimiento vertical constante. Excluyendo la forma y ondulación del material aportado y sin tener en cuenta más que el área aportada, el crecimiento por capa (H_L) puede determinarse como el espesor constante obtenido por el modelo, asumiendo un recubrimiento formado por bloques rectangulares con la misma área que las

partes solapadas del modelo (Figura IV-7.b). El área del cordón adicional podría determinarse como el área necesaria para obtener un espesor constante en cada extremo. Si se emplean los mismos parámetros para todos los cordones del recubrimiento, el área necesaria dependerá del porcentaje de solapamiento, aumentando el área necesaria a mayor solapamiento, y pudiéndose expresar el área necesaria como un porcentaje del área de cordón simple (Figura IV-8). Esta falta de material no se observa al fabricar paredes con dos cordones solapados por capa, debido a que la cantidad de material depositado en la zona de solapamiento se distribuye entre ambos cordones en las sucesivas capas.

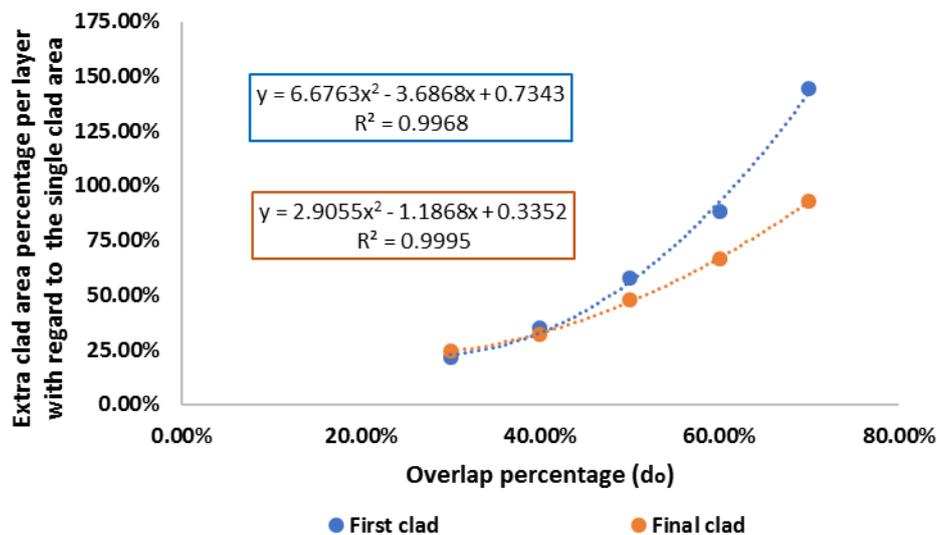


Figura IV-8. Representación del área extra necesaria para compensar la falta de material en los bordes del recubrimiento dependiendo del porcentaje de solapamiento. Área representada en el porcentaje correspondiente del área del cordón simple. En azul: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la primera parte del recubrimiento; Naranja: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la parte final del recubrimiento. Datos obtenidos del modelo para Alloy 718 depositado con el cabezal verticalmente a 2500 W , $18\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ and $500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Con el fin de validar esta estrategia de aporte, se han fabricado dos paredes rectas con y sin cordones extras en los bordes utilizando la boquilla discreta para comparar los resultados. Los parámetros principales empleados se muestran en la Tabla IV-7. Los cordones extra han sido calculados para el porcentaje de solapamiento de la pared según las ecuaciones de la Figura IV-8.

Tabla IV-7. Parámetros principales de la pared recta.

Potencia (W)	Avance (mm·min ⁻¹)	Flujo de polvo (g·min ⁻¹)	Solape (%)
2500	500	18	40

La estrategia de fabricación multicapa que se ha seleccionado está basada en la trayectoria de aporte R2 para paredes mostrada en el trabajo de Kono et al.

[Kono, 2018] y que fue con la que mejor resultado obtuvo. Esta estrategia tiene como punto de inicio de cada capa el mismo cordón, pero en sentido contrario a la capa previa (Figura IV-9). Esto permite empezar cada capa en el punto más alejado del último cordón aportado, es decir, en la zona más alejada de la zona de mayor temperatura evitando así problemas relacionados con un exceso de esta.

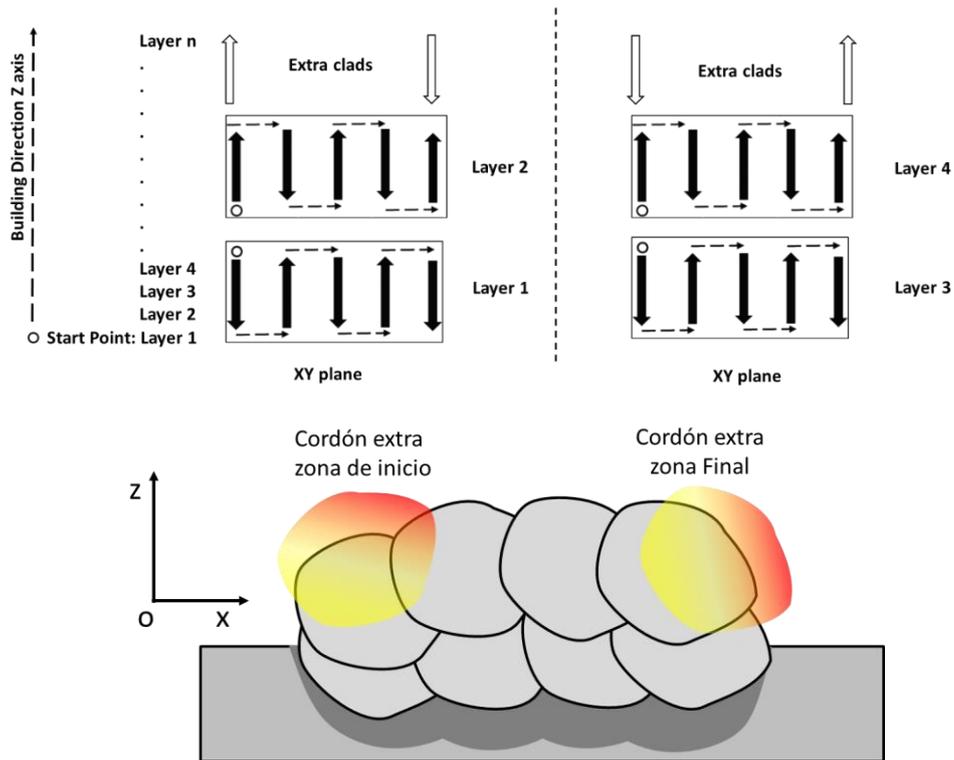


Figura IV-9. Esquema de la estrategia de fabricación con el cordón extra cada dos capas.

Como con el porcentaje de solapamiento empleado, la cantidad de material necesario por capa en los extremos para un correcto crecimiento es muy inferior a la del cordón aportado, se ha decidido añadir un cordón extra cada dos capas en vez de en cada una (Figura IV-9). Esto evita tener que aportar los cordones extra empleando parámetros del proceso de menor eficiencia. Al añadir un cordón extra cada dos capas con el doble del área calculada por el modelo por capa, el cordón extra resultante es similar al empleado en el resto de la estructura y se aporta en unas condiciones del proceso de eficiencia similar variando simplemente el avance a $600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. La pared ha sido fabricada con 12 capas de 6 cordones solapados y con una altura por capa de 1,3 mm calculada mediante el modelo. El cabezal se mantiene verticalmente durante todo el proceso de aporte.

La pared sin los cordones extra presenta distorsiones en los extremos que le dan una forma parabólica (Figura IV-10.a). Por otro lado, y tal y como cabía esperar, la distorsión aumenta drásticamente en las capas superiores. Por el contrario,

la pared fabricada con cordones extra en los extremos presenta una forma rectangular sin distorsiones significativas en los bordes y una altura total similar a la calculada permitiendo, si es necesario, aportar más capas sin dificultad (Figura IV-10.b).

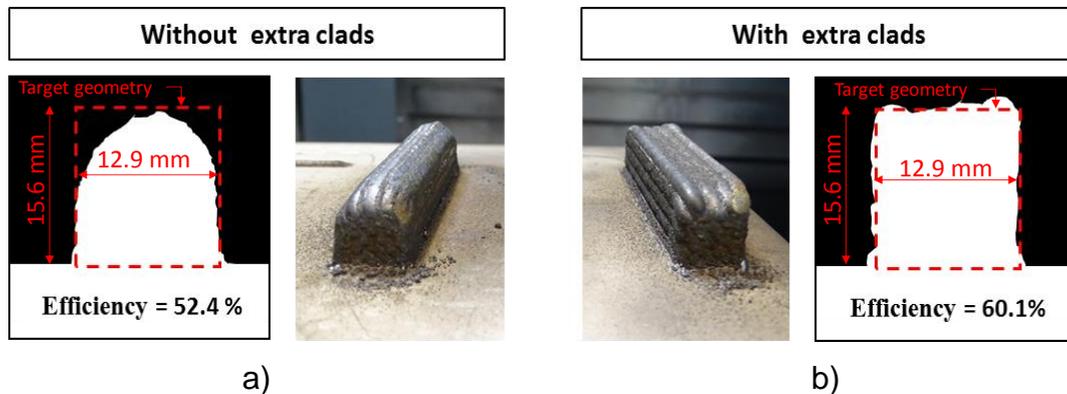


Figura IV-10. Resultados de la pared recta: a) Sección transversal de la pared sin cordones extra; b) Sección transversal de la pared fabricada con cordones extra.

Además de la pérdida de geometría, la distorsión genera una pérdida de eficiencia del proceso. Mientras que la pared con cordones extra mantiene una eficiencia similar a la del cordón individual del 60,1%, la pared sin cordones extra obtiene solo un 52,4% de eficiencia del proceso de aporte.

4 Adaptación del modelo para estructuras de sección variable

La estrategia para fabricar una geometría con una estructura multicapa de espesor variable requiere que se tengan en cuenta varios aspectos nuevos en comparación con el caso de una pared recta sobre sustrato horizontal: la inclinación de la boquilla y del sustrato, la evolución de las características del cordón simple con el ángulo de inclinación, la adaptación del proceso de aporte a la geometría variable de la estructura, y el desplazamiento horizontal máximo que se puede alcanzar por capa (ΔX).

A. Inclinación de la boquilla y del sustrato

Como se ha demostrado en el estudio experimental del proceso de aporte, aportar material con la boquilla coaxial continua de 0.5 mm verticalmente es la forma más eficiente de trabajo si se realiza tanto sobre un sustrato horizontal como inclinado. Sin embargo, en las aplicaciones o configuraciones de máquina en la que es necesario inclinar el cabezal para aportar el material correctamente, utilizar la boquilla discreta de 4 vías es la forma más eficiente de trabajar.

B. Evolución de las características del cordón simple con el ángulo

Como se ha visto en el estudio experimental del Capítulo III, las características del cordón individual varían con el ángulo de inclinación tanto del sustrato como del cabezal láser cambiando tanto la geometría del material aportado como la eficiencia del proceso. Este hecho cambia la altura por capa de la pared inclinada respecto a la pared aportada verticalmente y debe tenerse en cuenta en la programación de la trayectoria de aporte.

C. Adaptación a la geometría de la estructura

El hecho de que la sección de la estructura sea variable conlleva que tanto el número de cordones como el porcentaje de solapamiento debe ser recalculado en cada capa de la trayectoria para adaptarse a la geometría y evitar el aporte de material fuera del diseño geométrico de la estructura.

D. Desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX)

Como se ha concluido en el estudio experimental, dependiendo del cabezal y de la estrategia de fabricación sobre sustrato horizontal, hay un desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX) que limita la altura de capa para obtener el ángulo deseado. Este hecho limita la cantidad de material que se puede aportar por capa pudiendo reducir de forma drástica la tasa de aporte del proceso. En este sentido, la estrategia de aporte que da mejores resultados aportando sobre sustrato horizontal es la de aportar inclinando la boquilla discreta de 4 vías.

4.1 Cálculo de las trayectorias de aporte

En el caso de secciones variables el número de cordones por capa no es fijo y debe recalcularse en cada capa. A esto se debe añadir un porcentaje de solapamiento variable para adaptarse a la geometría aportando solamente dentro de los límites de esta. Además, utilizar un porcentaje de solapamiento variable obtiene como resultado capas de distinto crecimiento, es decir, un crecimiento de capa también variable. Sin embargo, no todos los porcentajes de solapamiento se consideran válidos en el rango de parámetros de este trabajo. Según lo obtenido en trabajos previos, un porcentaje de solapamiento menor del 40% obtiene un recubrimiento con demasiada ondulación y un bajo espesor efectivo tras el mecanizado. Además, apenas reduce la dilución del sustrato comparado con la obtenida en el cordón simple. Por el contrario, un solapamiento mayor de 60% genera recubrimientos de gran espesor, pero una baja dilución pudiendo llegar a generar faltas de fusión con el sustrato. Ambos casos pueden ser simulados por el modelo geométrico.

Por lo tanto, el porcentaje de los cordones de cada capa debe estar en este rango aumentando el número de cordones por capa cuando el porcentaje sea menor

de 40% y disminuyendo el número de cordones por capa cuando el porcentaje sea mayor de 60% y adaptándose a la longitud necesaria de la sección o recubrimiento (L_c) (Figura IV-11).

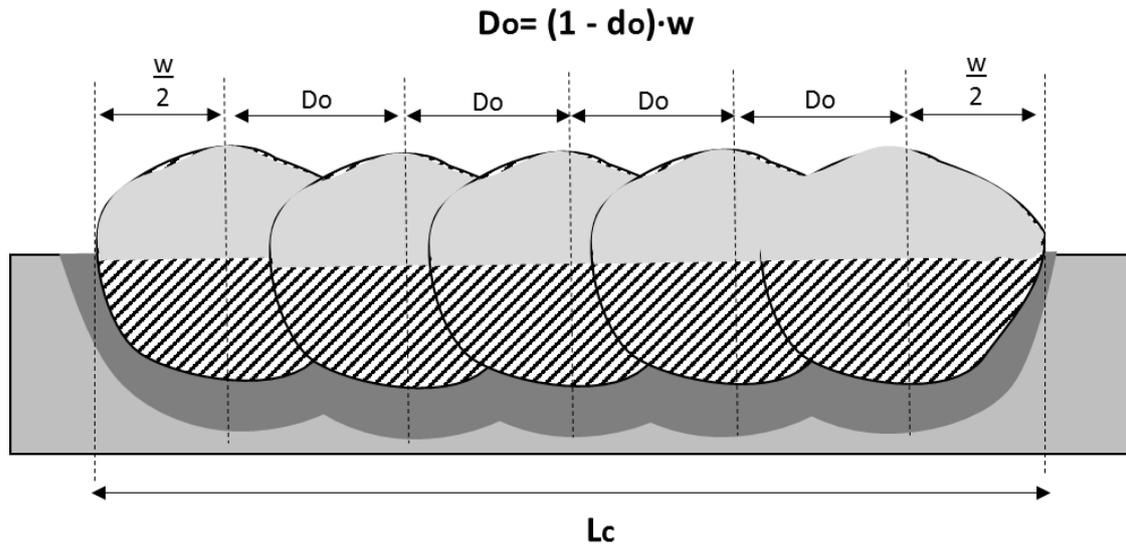


Figura IV-11. Longitud del recubrimiento o sección (L_c).

Aunque cada geometría debe valorarse de forma independiente, una condición que permite que el solapamiento siempre esté dentro de este rango es que el número mínimo de cordones en la sección de menor dimensión de la geometría sea de tres al 40% de solapamiento independientemente de la anchura del cordón individual. Esta afirmación es fácilmente comprobable matemáticamente resolviendo la ecuación de la longitud de la sección (Eq. 58) donde w es la anchura del cordón individual, N_c es el número de cordones de la sección, D_o es la distancia de solapamiento y d_o es el porcentaje de solapamiento de la anchura del cordón individual.

$$L_c = w + (N_c - 1) \cdot D_o = w + (N_c - 1) \cdot (1 - d_o) \cdot w \quad \text{Eq. 58}$$

En el caso de una estructura cuya sección aumenta en longitud a mayor altura, el caso más crítico es el de la transición de una sección con un solapamiento al 40% a otra sección de la misma dimensión (un incremento infinitesimal) que obligue a añadir otro cordón (N_c+1) ya que el solapamiento solo con N_c cordones sería menor del 40%. Resolviendo el porcentaje de solapamiento del caso con $N_c + 1$ con la Eq. 58 suponiendo la misma longitud de sección para un caso de N_c cordones y 40% de d_o , y otro de $N_c + 1$ cordones, se obtiene que solo los

casos con menos de tres cordones no están en el rango de solapamiento determinado (40 a 60%) independientemente de la longitud y de la anchura del cordón (Eq. 59). La Figura IV-12 muestra la progresión del porcentaje de solapamiento en función del número de cordones.

$$w + (N_c - 1) \cdot (1 - d_{40\%}) \cdot w = w + ((N_c + 1) - 1) \cdot (1 - d_o) \cdot w \quad \text{Eq. 59}$$



$$d_{o(N_c+1)} = 1 - \left(\frac{(N_c - 1) \cdot (1 - d_{40\%})}{((N_c + 1) - 1)} \right)$$

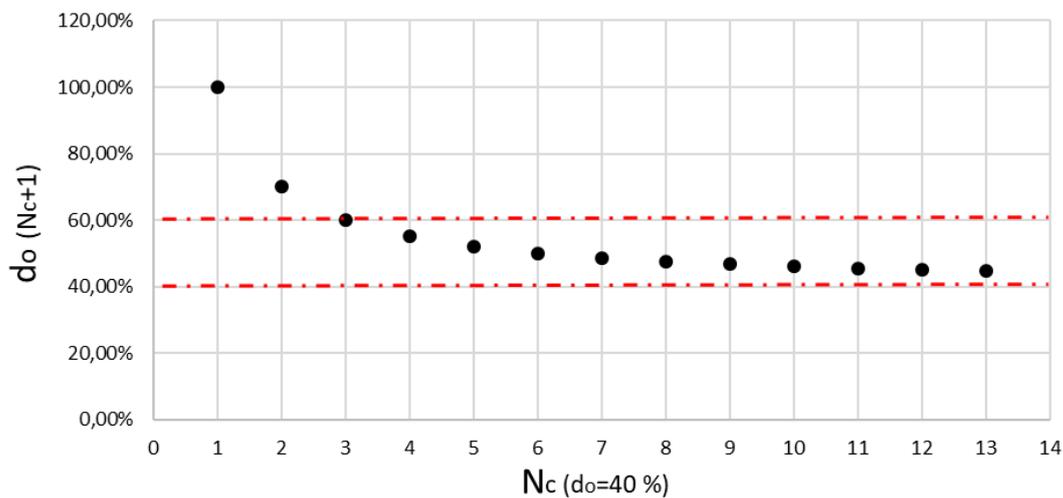


Figura IV-12. Porcentaje de solapamiento de $N_c + 1$ cordones con relación a una capa con la misma sección con N_c cordones al 40 %.

En el caso de estructuras con secciones que disminuyen en dimensión con la altura, también se puede aplicar la condición de tres cordones con un solapamiento del 40% en su sección mínima para que siempre esté dentro del rango de solapamiento determinado.

Plantear un rango del 40 al 60% de solapamiento presenta otra ventaja que se puede comprobar con el modelo dentro del rango de parámetros empleado en esta tesis: la relación entre el área necesaria del cordón extra y el porcentaje de solapamiento puede considerarse lineal (Figura IV-13) en vez de polinómica (Figura IV-8), por lo que, en el caso de estructuras de sección variable, permite simplificar el cálculo del área necesaria a la obtenida con un valor medio del porcentaje de solapamiento de todas las capas. La altura de capa también se

puede considerarse como un valor constante obtenido de la media de todos los espesores de capa de la estructura calculados por el modelo.

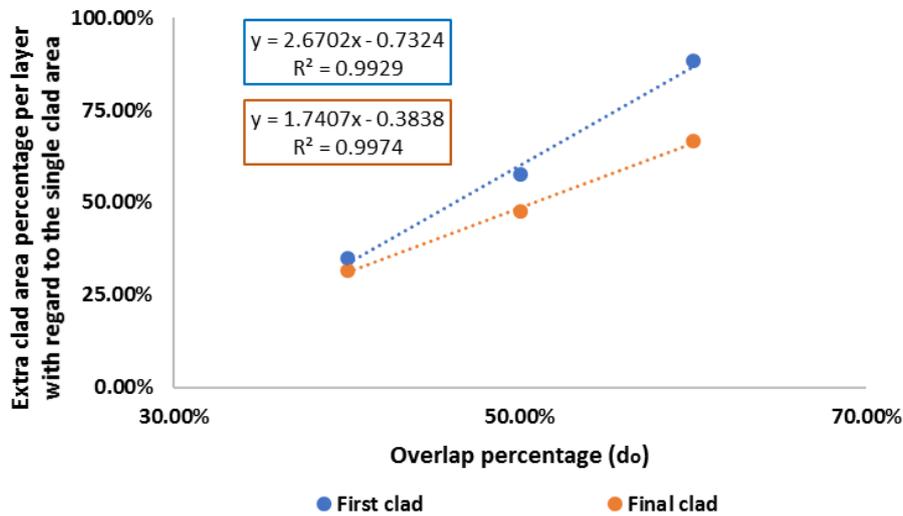


Figura IV-13. Área extra necesaria para compensar la falta de material en los bordes en función del porcentaje de solapamiento. Área representada en el porcentaje correspondiente del área del cordón simple. En azul: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la primera parte del recubrimiento; Naranja: Porcentaje del área del cordón simple necesaria en la parte final del recubrimiento. Datos obtenidos del modelo para Alloy 718 depositado con el cabezal verticalmente a 2500 W, 18 g·min⁻¹ and 500 mm·min⁻¹.

4.2 Algoritmo de la trayectoria

Se toma como ejemplo de cálculo el caso más sencillo de paredes de sección variable en el cual solo es necesario establecer una longitud en el eje Y, ya que la trayectoria en ese eje es lineal, y se debe trabajar con la sección transversal del plano XZ. En este caso es necesario introducir las ecuaciones del eje X del perfil de la estructura en función del eje vertical Z para iniciar el cálculo (Eq. 60 y 61).

$$\text{Ecuación 1} = x_1 = f_1(z) \quad \text{Eq. 60}$$

$$\text{Ecuación 2} = x_2 = f_2(z) \quad \text{Eq. 61}$$

Con una altura media de capa constante puede dividirse la estructura en el número de capas (n) necesario según la altura que se quiere obtener. Posteriormente, con ambas ecuaciones del perfil y la anchura del cordón individual se puede calcular la dimensión de cada capa de la estructura y el porcentaje de solapamiento para un número determinado de cordones (Eq. 62). El sentido del aporte en cada capa puede ser establecido simplemente estableciendo un contador y un sentido distinto según sea la capa par o impar.

$$L_c = x_2 - x_1 = w + (N_c - 1) \cdot D_o \Rightarrow d_o = 1 - \frac{(x_2 - x_1 - w)}{(N_c - 1) \cdot w} \quad \text{Eq. 62}$$

Por tanto, el algoritmo inicia un proceso de cálculo del porcentaje de solapamiento en cada capa para una anchura de cordón fija y establecida, aumentando o disminuyendo el número de cordones hasta que se obtiene un porcentaje de solapamiento entre 40 y 60% (Figura IV-14).

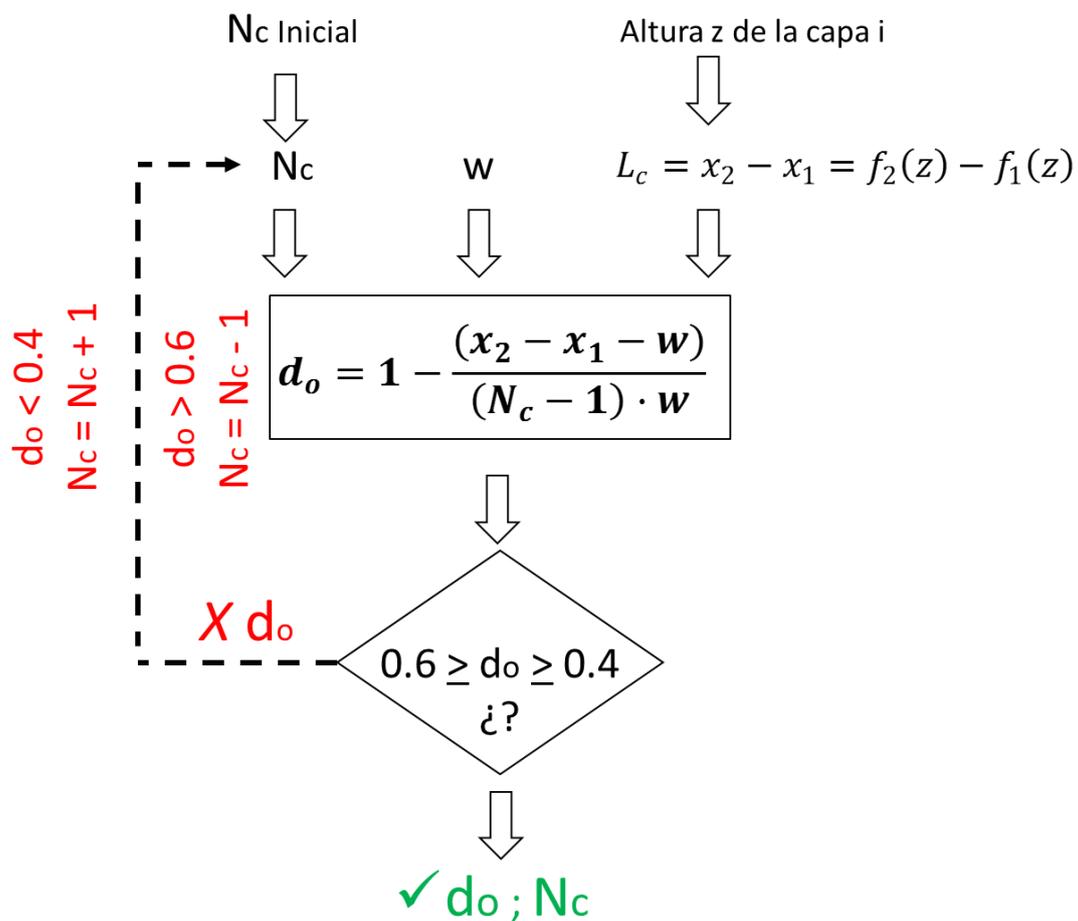


Figura IV-14. Lógica de cálculo del algoritmo.

Por comodidad se establece que todas las geometrías de las paredes se fabrican en el intervalo positivo del eje x desde el origen seleccionado. Esta posición permite razonar 4 casos lógicos (Figura IV-15) con estrategias diferenciadas en función del sentido de la inclinación del cabezal para cada caso.

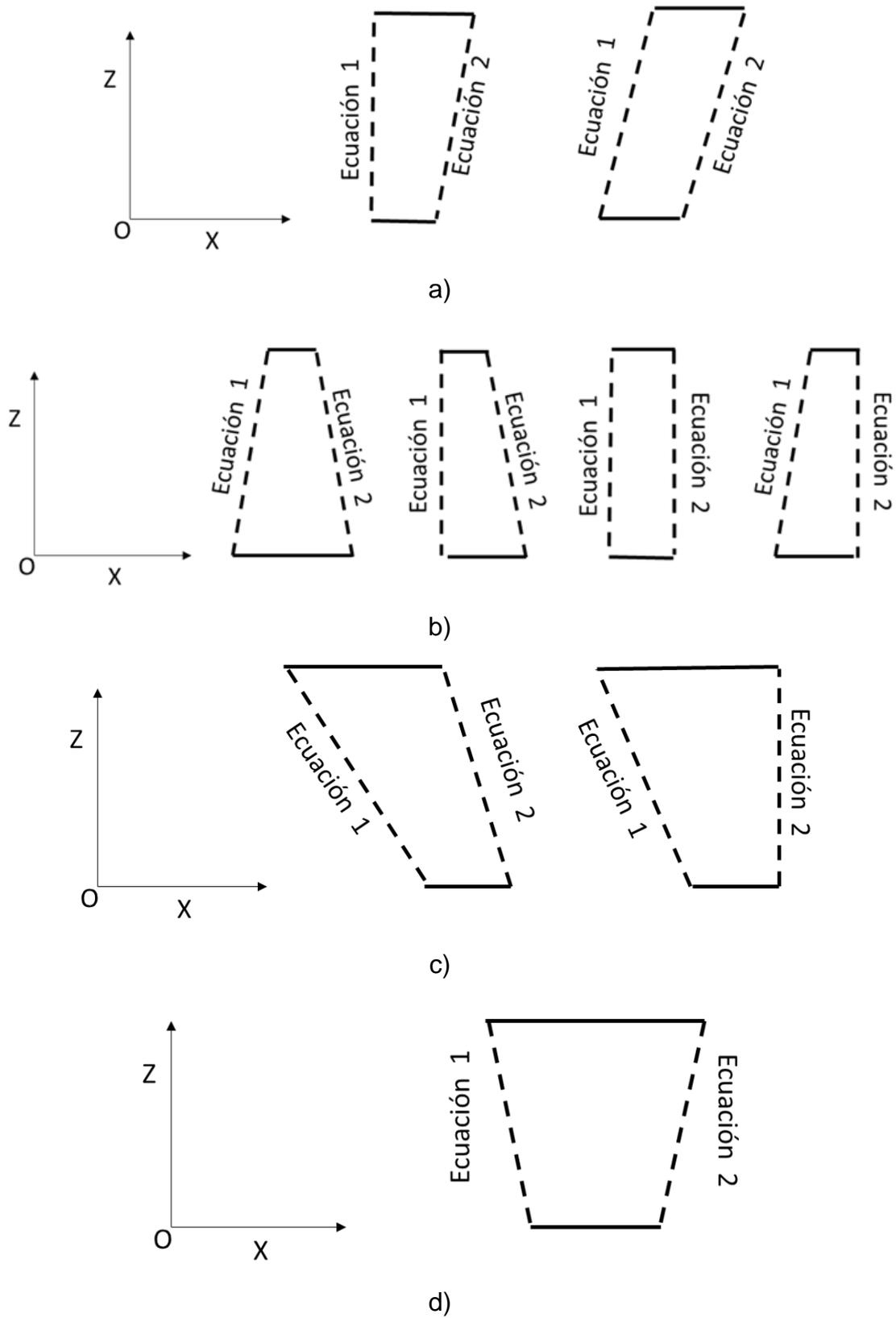
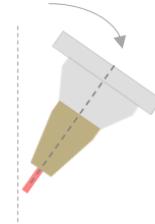


Figura IV-15. Geometrías posibles en función de la geometría: a) Geometrías dentro del caso 1; b) Geometrías dentro del caso 2; c) Geometrías dentro del caso 3; d) Geometría dentro del caso 4.

- Caso 1 (Figura IV-15.a): Cabezal orientado en la dirección de inclinación del perfil de la ecuación 2. Inicio de la trayectoria de aporte en el extremo de la ecuación 1.

$$x_1 (z \text{ de capa } n) \leq x_1 (z \text{ de capa } n + 1)$$

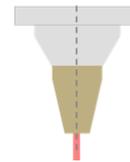
$$x_2 (z \text{ de capa } n) < x_2 (z \text{ de capa } n + 1)$$



- Caso 2 (Figura IV-15.b): Cabezal recto. Inicio de la trayectoria de aporte en cualquier extremo.

$$x_1 (z \text{ de capa } n) \leq x_1 (z \text{ de capa } n + 1)$$

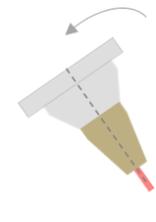
$$x_2 (z \text{ de capa } n) \geq x_2 (z \text{ de capa } n + 1)$$



- Caso 3 (Figura IV-15.c): Cabezal orientado en la dirección de la inclinación del perfil de la ecuación 1. Inicio de la trayectoria de aporte en el extremo de la ecuación 2.

$$x_1 (z \text{ de capa } n) > x_1 (z \text{ de capa } n + 1)$$

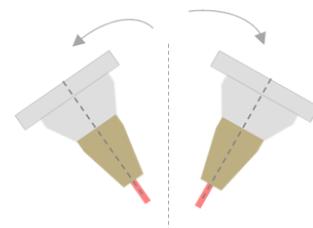
$$x_2 (z \text{ de capa } n) \geq x_2 (z \text{ de capa } n + 1)$$



- Caso 4 (Figura IV-15.d): Cabezal orientado en la dirección de la inclinación del perfil de las ecuaciones de ambos extremos. Inicio de la trayectoria de aporte en cualquier extremo.

$$x_1 (z \text{ de capa } n) > x_1 (z \text{ de capa } n + 1)$$

$$x_2 (z \text{ de capa } n) < x_2 (z \text{ de capa } n + 1)$$



4.3 Validación

4.3.1 Crecimiento de la sección variable en un lado (Caso 1 y 3)

Ambos casos (Caso 1 y 3) son idénticos salvo en que el punto inicial de la trayectoria es distinto por lo que se pueden considerar equivalentes. Para validar la estrategia en este caso se ha fabricado una pared con un extremo recto y otro inclinado con un ángulo (θ) de 66° (Figura IV-16.a) sobre un sustrato horizontal inclinando el cabezal hasta alcanzar una configuración coaxial con θ (Figura IV-16.b).

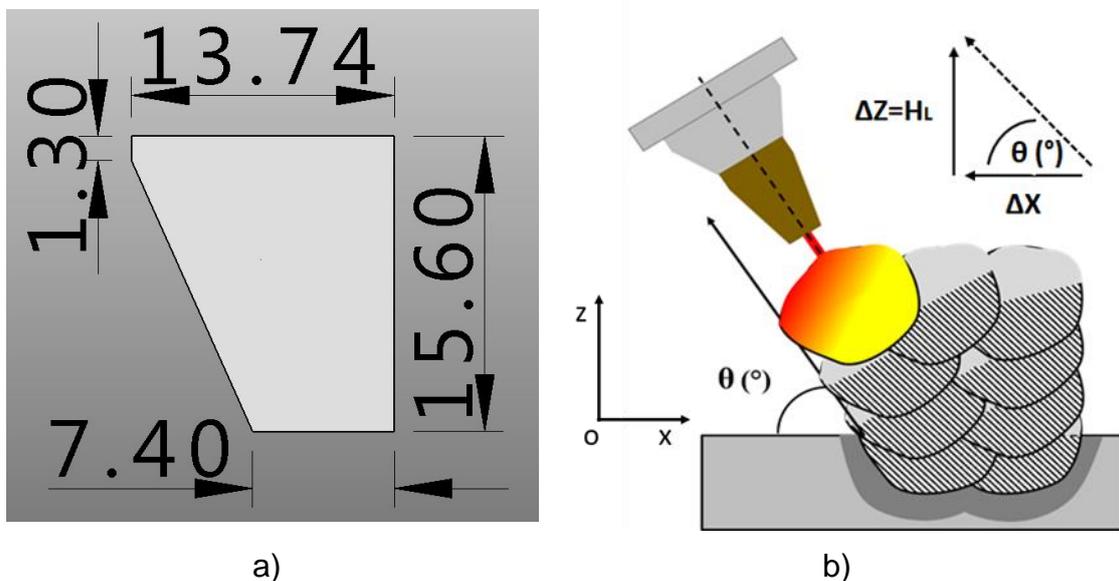


Figura IV-16. a) Sección transversal del CAD de la geometría en mm; b) Esquema de la estrategia de aporte.

Como se ha visto en el estudio experimental de la estrategia de aporte de paredes inclinadas del Capítulo III, el máximo desplazamiento horizontal (ΔX) junto con el ángulo definen el crecimiento máximo por capa (ΔZ) para obtener la geometría (Figura IV-16.b). A esto hay que añadir que las dimensiones de la pared inclinada cambian con el ángulo ya que las características del cordón individual que forma la pared evolucionan con el ángulo de inclinación del cabezal. Por tanto, una vez obtenidas las características mediante las ecuaciones del proceso aportando cordones con el cabezal verticalmente, se debe recalculan las características según su evolución con el ángulo de inclinación (Figura IV-17).

Debido a que el primer cordón de la trayectoria puede presentar menor altura que el resto de los cordones de la capa por la diferencia de material que tiene respecto a estos, se ha aportado el cordón inicial siempre verticalmente para que

el resto de los cordones de mayor altura no obstaculicen el proceso de aporte en esa zona (Figura IV-18). El resto de los cordones se han orientado según θ .

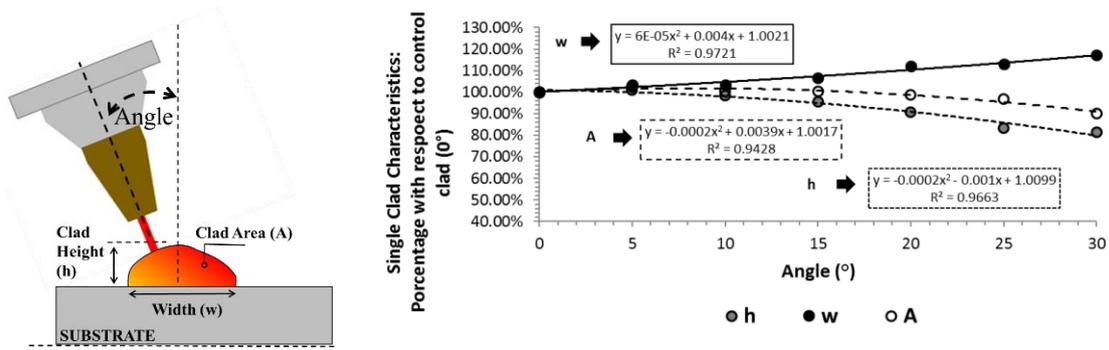


Figura IV-17. Efecto de la inclinación de la boquilla en las características del cordón simple.

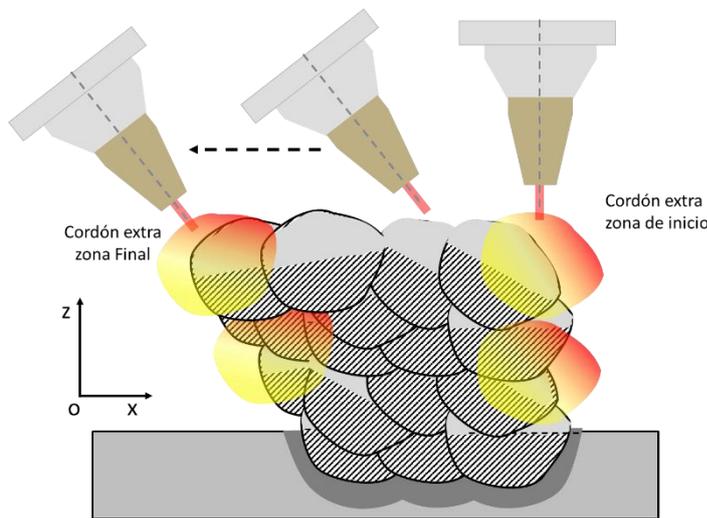


Figura IV-18. Esquema de la estrategia empleada en los Casos 1 y 3. Zona de inicio con aporte de material con el cabezal recto. Resto de cordones aportados en la dirección del extremo final de la geometría con el cabezal inclinado.

En este caso se emplean los parámetros de la Tabla IV-8. El número de cordones y el porcentaje de solapamiento se han adaptado a la geometría en cada capa según lo expuesto en el algoritmo. La Tabla IV-9 muestra los parámetros del proceso.

Tabla IV-8. Validación del Caso 1 y 3. Parámetros del proceso.

P (W)	v (mm·min ⁻¹)	m _p (g·min ⁻¹)	d _o (%)	ΔZ (mm)	ΔX (mm)	θ (°)	η (%)
2500	500	18	40-60	1,3	0,58	66	60

Como en el rango de solapamiento entre 40 y 60% la relación puede considerarse lineal, se ha empleado un valor medio para calcular el cordón extra necesario en cada extremo. La altura de capa programada en la trayectoria también corresponde al valor medio de las alturas que se han obtenido por capa

según el modelo. El número de cordones se ha adaptado a las condiciones de cada capa. Según las medias obtenidas en la Tabla IV-9, la altura de capa ha sido de 1,3 mm. Al igual que en la validación en paredes rectas, se ha aportado un cordón extra cada dos capas para emplear parámetros de mayor eficiencia. Las velocidades de los cordones extra para el valor medio del porcentaje de solapamiento fueron de 430 y 500 mm·min⁻¹ para la zona de inicio y final respectivamente.

Tabla IV-9. Parámetros de cada capa y valor medio total. Porcentaje de solapamiento (d_o), número de cordones por capa (N_c) y altura de capa calculada por el modelo (H_L).

Capa	d_o (%)	N_c	H_L
1	50	3	1,3
2	42,2	3	1,1
3	56,3	4	1,5
4	51	4	1,3
5	59,4	5	1,6
6	55,5	5	1,4
7	51,6	5	1,3
8	47,7	5	1,2
9	55	6	1,4
10	51,9	6	1,3
11	48,8	6	1,3
12	45,7	6	1,1
Media	51,4	5	1,3

La estructura presenta la forma geométrica esperada con pequeñas distorsiones en los extremos y una altura total cercana a la esperada con una variabilidad baja. La sección transversal, medida mediante el software Clemex Captiva®, presenta ciertas ondulaciones y diferencias con las dimensiones teóricas (Figura IV-19).

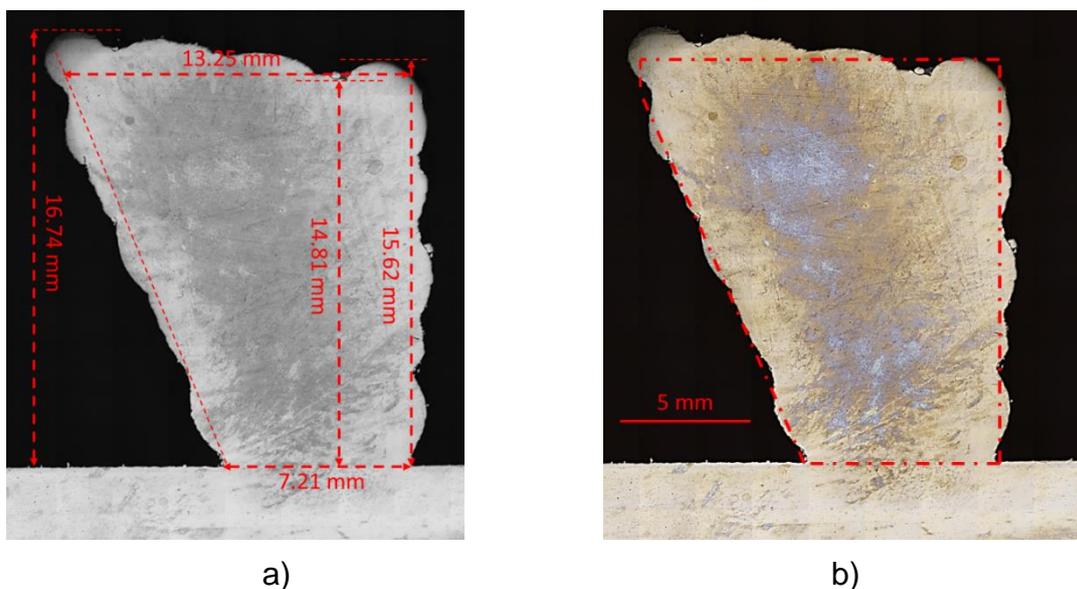


Figura IV-19. Sección transversal: a) Dimensiones; b) Comparación con el CAD.

Sin embargo, el porcentaje de solapamiento variable es suficiente para fijar el material aportado en la geometría esperada y la estrategia del cordón extra proporciona un crecimiento estable.

En el extremo inclinado se obtienen desviaciones dimensionales máximas respecto del eje horizontal, con respecto de la geometría objetivo, de 0,51 mm y -0,48 mm donde el valor negativo representa falta de material. El extremo recto presenta desviaciones máximas en el eje horizontal con respecto a la geometría objetivo de 0,67 mm y -0,16 mm. La altura máxima y mínima en el eje vertical genera desviaciones máximas en relación con la altura objetivo de 1,14 mm y -0,79 mm. Los resultados corresponden a una desviación máxima de 7.3% y -5% de la altura objetivo. En cuanto al área depositada, el 6,95% del área total se deposita fuera de la geometría teórica: el 2,44% del área en el extremo recto, el 0,73% en el extremo inclinado y el 3,78% dentro de la zona de exceso de altura. A pesar de las desviaciones, el área depositada se puede considerar muy similar al área objetivo, por lo que se puede concluir que se mantiene la misma eficiencia que en el caso del cordón simple al fabricar la estructura multicapa.

Los resultados sugieren que es necesario fabricar la geometría con un espesor extra con al menos el valor de las diferencias dimensionales relacionadas con la falta de material y con una altura extra mayor de al menos el 5% para obtener la geometría objetivo después del mecanizado. Las diferencias dimensionales máximas relacionadas con un exceso de material se deben considerar entonces como punto de partida para el proceso de mecanizado posterior. Es de esperar que la ondulación presente en la geometría final provoque una variación considerable en la fuerza de corte durante la primera pasada del mecanizado.

Existe la posibilidad de obtener diferentes parámetros para mejorar la geometría (por ejemplo, menor altura por capa o menor potencia del láser en un intento de reducir la ondulación), pero, dependiendo de los parámetros del proceso, la eficiencia y productividad del proceso de aporte podría disminuir. Por lo tanto, cualquier ahorro en el proceso de mecanizado debe valorarse cuidadosamente con la eficiencia y las pérdidas de productividad dentro del proceso de aporte.

Si bien se valida la estrategia y se logra obtener una precisión aceptable en la geometría, la ondulación que se observa en la estructura y las diferencias obtenidas en su altura, resaltan la necesidad de implementar sistemas de monitorización y control durante el proceso, con el fin de mejorar la geometría. En este sentido, y tal y como se ha mencionado en el Capítulo II de este trabajo, ya existen en el mercado controles para minimizar la variabilidad del proceso de aporte con polvo basados en controlar el tamaño del baño fundido mediante el control de la potencia del láser o en controlar la altura de la capa regulando el

avance del proceso. El primer tipo de control corrige las inestabilidades relacionadas con un exceso de entrada de calor y el segundo corrige las inestabilidades relacionadas con la cantidad de material aportado por capa.

Para completar la validación, se ha obtenido una sección transversal de la pared que ha sido pulida y sometida a ataque químico, con el fin de analizar tanto su estructura como sus defectos (Figura IV-20).

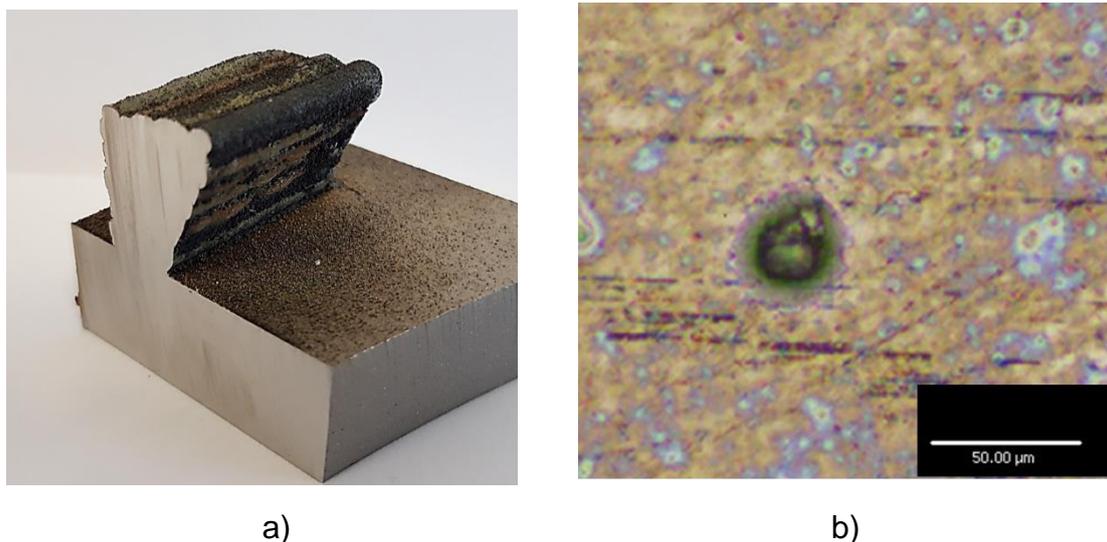


Figura IV-20. Resultados: a) Corte de la geometría de sección variable para analizar la estructura y las dimensiones geométricas; b) Poro de menos de 25 µm.

La estructura no presenta grietas y solo se han encontrado unos pocos poros aislados con diámetros menores a 25 µm en la sección transversal (Figura IV-20.b). La necesidad de tratamiento HIP dependería de las especificaciones de porosidad de la aplicación [Zhong, 2016].

La estructura presenta también largos granos columnares por lo que se puede esperar anisotropía en las propiedades mecánicas, una fuerte reducción de la elongación a la rotura y mayor dureza en comparación con el mismo material forjado y recocido, además de tensiones residuales desfavorables. Esta estructura podría incrementar la resistencia al desgaste en aplicaciones de recubrimiento, aunque puede reducir la vida útil del componente sometido a desgaste por fatiga, debido a la iniciación prematura de grietas. Por tanto, es necesario un proceso de tratamiento térmico posterior [Zhang, 2017] para mejorar las propiedades del material, transformar los granos columnares en granos equiaxiales y eliminar la anisotropía del material por homogeneización antes de los tratamientos de envejecimiento y posterior mecanizado.

4.3.2 Sección variable en ambos lados (Caso 4)

Este caso requiere de más modificaciones ya que presenta mayor sección en ambos extremos a mayor altura. Como para un correcto crecimiento la mejor opción es inclinar el cabezal en la dirección de inclinación de la geometría, se ha optado por una estrategia similar a las del caso 1 y 3. En este caso el primer cordón de la capa se aporta con el cabezal inclinado siguiendo la inclinación de la pared en ese extremo, el segundo cordón se aporta verticalmente y el resto de los cordones se aportan con el cabezal siguiendo la inclinación del otro extremo (Figura IV-21). El segundo cordón de la capa se deposita verticalmente como cordón de transición entre el primero y el tercero debido a que se espera un crecimiento de grano en direcciones opuestas entre ellos. Aunque en la Figura IV-21 se muestra un extremo de inicio y final de aporte, se puede iniciar la trayectoria desde el extremo contrario al igual que en el Caso 2.

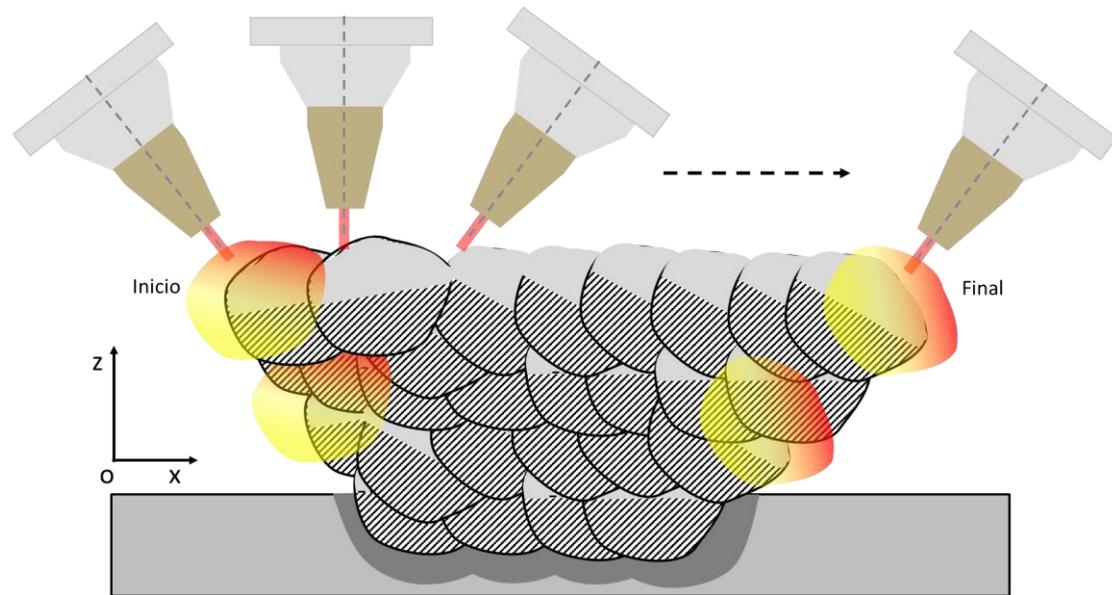


Figura IV-21. Estrategia de aporte del caso 4.

Para validar esta estrategia se ha optado por una geometría tipo cola de milano. Como se puede ver en la Tabla IV-10, se han empleado los mismos parámetros que en la validación de la estructura con sección variable en un lado.

Tabla IV-10. Parámetros del proceso.

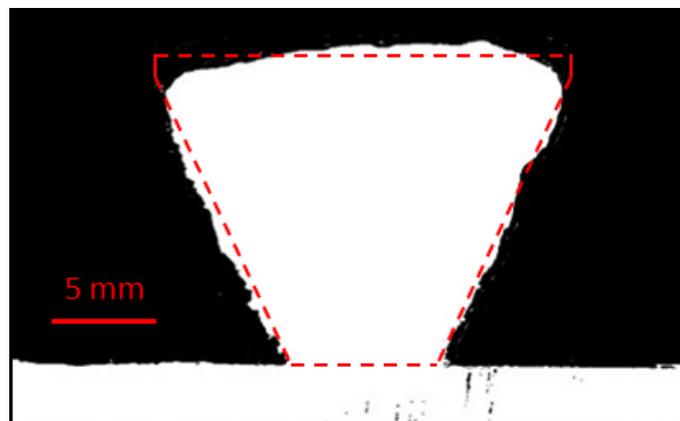
P (W)	v (mm·min ⁻¹)	m _p (g·min ⁻¹)	d _o (%)	ΔZ (mm)	ΔX (mm)	θ (°)	η (%)
2500	500	18	40-60	1.3	0.58	65	60

Tras el aporte de material, se ha cortado una sección transversal de la geometría para su análisis dimensional y para comprobar defectos macroscópicos (Figura

IV-22.a). La sección obtenida se ha comparado con el CAD teórico (Figura IV-22.b) obteniéndose defectos similares a los obtenidos en la validación anterior.



a)



b)

Figura IV-22. Cola de Milano: a) Corte de la sección transversal; b) Comparación de la sección real con la geometría objetivo.

Estos defectos incluyen un sobreespesor de material y una altura final de la geometría algo inferior en los extremos a la altura del CAD que hacen evidente de nuevo la necesidad de un sistema de control del proceso que actúe durante el mismo para controlar las dimensiones. Sin embargo, la geometría obtenida no presenta faltas de llenado y es muy similar al objetivo por lo que valida la estrategia.

Para completar el estudio, se ha pulido y atacado químicamente una sección transversal de la pared (Figura IV-23) con el fin de analizar tanto su estructura como sus defectos. Al igual que en la sección analizada en la validación del caso anterior, la estructura no presenta grietas, la porosidad puede considerarse despreciable y presenta largos granos columnares, así como una estructura de dendritas celulares con dendritas columnares y finas.

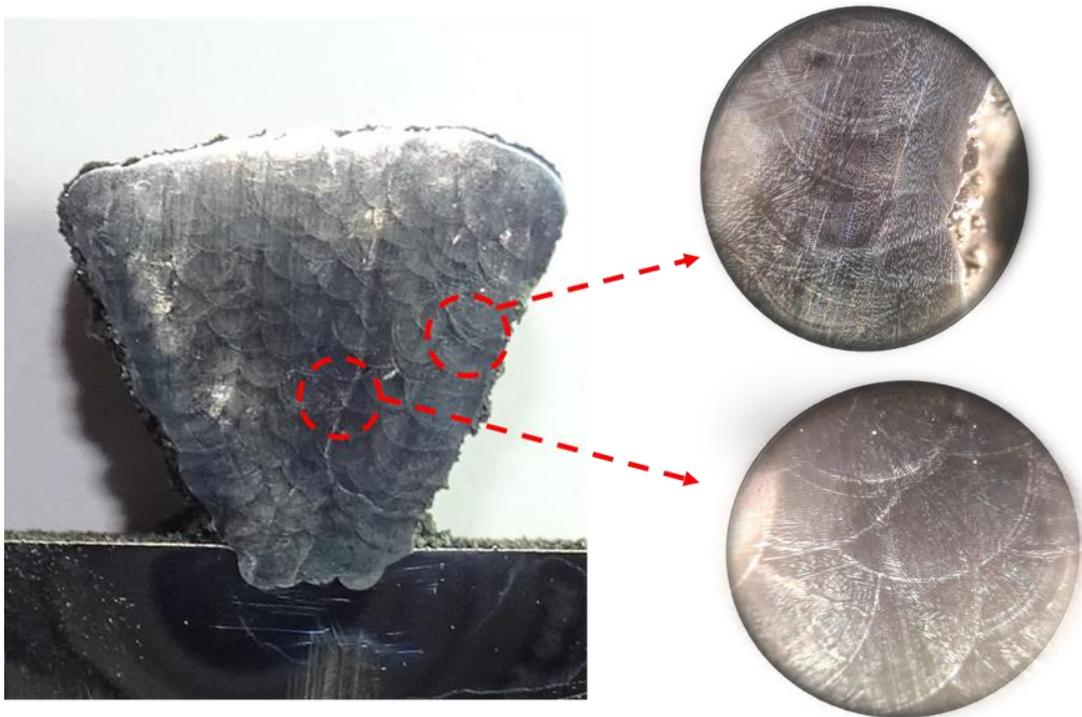


Figura IV-23. Sección tras ataque químico y microestructura.

Por lo tanto, al igual que en la anterior estructura validada, es de esperar anisotropía en las propiedades mecánicas, una fuerte reducción de la elongación a la rotura y mayor dureza en comparación con el mismo material forjado y recocido, además de tensiones residuales desfavorables. Se trata de un análisis coherente con las propiedades mecánicas obtenidas en el Capítulo III, en las que se muestran los resultados de los ensayos de tracción de diferentes probetas que muestran un grado de anisotropía y una reducción de la elongación respecto a valores de referencia de productos forjados. Por tanto, es necesario un proceso de tratamiento térmico posterior para mejorar las propiedades del material, transformar los granos columnares en granos equiaxiales y eliminar la anisotropía del material por homogeneización antes de los tratamientos de envejecimiento y posterior mecanizado.

5 Conclusiones del modelo geométrico desarrollado

A lo largo de este capítulo se ha desarrollado un modelo geométrico capaz de estimar la altura y anchura de las capas aportadas. Tanto el modelo geométrico propuesto como las estrategias y el algoritmo de la trayectoria han sido validadas para recubrimientos y estructuras de sección constante y variable de Inconel 718.

El modelo geométrico validado resulta de utilidad en primer lugar para comprender la influencia de cada parámetro y la geometría del cordón individual

en la fabricación de recubrimientos y estructuras. Por otro lado, también sirve para seleccionar los parámetros en función de los requisitos del recubrimiento tales como el espesor efectivo o la dilución con el sustrato, así como para detectar la falta de fusión con el sustrato debido a un porcentaje de solapamiento excesivo. Por último, el modelo también permite seleccionar la estrategia y la trayectoria en el proceso de aporte, y seleccionar la estrategia de mecanizado posterior al aporte en función de la geometría prevista por el modelo.

El modelo desarrollado en Inconel 718 se ha validado también en otro material como es el Eutroloy 16606A.04, por lo que es de esperar que las estrategias y el algoritmo desarrollados den los mismos buenos resultados.

Es necesario fabricar la geometría con un espesor extra con al menos el valor de las diferencias dimensionales relacionadas con la falta de material y con una altura extra mayor para obtener la geometría objetivo. Las diferencias dimensionales máximas relacionadas con un exceso de material se deben considerar entonces como punto de partida para el proceso de mecanizado posterior. Es de esperar que la ondulación presente en la geometría final provoque una variación considerable en la fuerza de corte durante la primera pasada del mecanizado.

Si bien se validan las estrategias y se logra obtener una precisión aceptable en la geometría, la ondulación que se observa en las estructuras y las diferencias obtenidas en sus alturas, resalta la necesidad de implementar sistemas de monitorización y control durante el proceso, con el fin de mejorar la geometría.

Las estructuras fabricadas no presentan grietas, la porosidad puede considerarse despreciable y presentan largos granos columnares, así como una estructura de dendritas celulares con dendritas columnares y finas. Debido a esta estructura, se puede esperar anisotropía en las propiedades mecánicas, una fuerte reducción de la elongación a la rotura y mayor dureza en comparación con el mismo material forjado y recocido, además de tensiones residuales desfavorables. Por tanto, es necesario un proceso de tratamiento térmico posterior para mejorar las propiedades del material, transformar los granos columnares en granos equiaxiales y eliminar la anisotropía del material por homogeneización antes de los tratamientos de envejecimiento y posterior mecanizado.

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V: VALIDACIÓN

Este capítulo se centra en la validación tanto del modelo geométrico como de la estrategia de aporte y el algoritmo desarrollado en el Capítulo IV. Para ello, se ha empleado una pieza test que emula la fabricación de carcassas de turbinas de baja presión mediante aporte láser. Se trata de un caso de estudio dentro del proyecto europeo PARADDISE y que se planteó en conjunto con la empresa GKN aerospace Norway, proveedor multitecnológico aeroespacial. El objetivo de esta validación ha sido la implantación del desarrollo planteado y analizar los resultados conseguidos en una pieza de complejidad similar a las piezas que se emplean en la industria.

1 Introducción

La industria de la aviación comercial tiene algunos de los estándares de rendimiento más estrictos y, en este momento, los procesos de fabricación aditiva tienen una tasa de aceptación muy baja entre los fabricantes y clientes aeroespaciales, especialmente cuando se trata de componentes del motor. De todos estos componentes se ha seleccionado como aplicación de uso la fabricación/repación de carcassas de turbinas aeronáuticas ya que las máquinas híbridas pueden ayudar a superar algunos retos en la producción actual de este tipo de componentes. Por un lado, se trata de una pieza estática en el motor aeronáutico, por lo que los requisitos de integridad del componente no son tan estrictos como las piezas rotativas. Por otro lado, se trata de piezas de tamaño medio-grande, por lo que es necesario emplear máquinas que contemplen un volumen de trabajo suficientemente amplio.

Las carcassas de las turbinas de baja presión tienen forma de cono hueco y se caracterizan por tener varios rieles internos y dos rebordes (superior e inferior) para rigidizar la pieza. Estas piezas están hechas de aleaciones termorresistentes que pueden ser aleaciones base Titanio o base Níquel. En concreto, se ha planteado el caso de una carcassa de zonas calientes del motor fabricada en una aleación base níquel (Inconel 718). El diámetro medio de estos componentes oscila entre 0,6 y 1,2 m, con una altura de 300 a 400 mm y un espesor medio de pared entre 5 y 10 mm; por lo general, las carcassas tienen un peso final de entre 17 y 40 kg.

El proceso de fabricación actual comienza a partir de una pieza forjada mecanizada en bruto mediante varias operaciones, incluido el torneado del diámetro interno y externo, el fresado de varias características externas e internas y el ensamblaje de insertos. Sin embargo, el mecanizado de estos

componentes es un desafío debido a tolerancias estrictas, geometrías complejas, paredes delgadas y materiales difíciles de mecanizar. Así pues, tanto las vibraciones debidas al comportamiento dinámico de estas estructuras, como errores en la máquina o del operador pueden provocar errores dimensionales durante el mecanizado de las carcasas, como por ejemplo un diámetro externo demasiado pequeño, o errores de espesor en algunas secciones.

Por lo tanto, los beneficios que se esperan de la aplicación de una máquina híbrida para la fabricación de estos componentes son:

- Reducción del tiempo total de fabricación y la cantidad de operaciones, mediante el aporte de detalles en la materia prima.
- Posibilidad de reparar carcasas dañadas.
- Posibilidad de evitar chatarra reparando aquellas carcasas desechadas por pequeños errores de fabricación.
- Posible integración en la cadena de producción.

En la actualidad, estas carcasas solo se pueden reparar agregando material por proyección térmica y aplicando un mecanizado posterior. Hoy en día, este proceso es caro y requiere mucho tiempo debido al trabajo adicional de certificación para aprobar formalmente cada reparación individualmente. Esto se debe fundamentalmente a las características del material añadido por proyección térmica, el cual presenta una unión basada en una deformación mecánica sobre el sustrato y cuyas propiedades mecánicas son muy inferiores a las del material base. Unificar el proceso aditivo y sustractivo en la misma máquina pueden ser una mejor forma de reparar una pieza dañada y, por lo tanto, reducir el coste de reparación; Sin embargo, deben investigarse las limitaciones del proceso de aporte por láser. Además, se puede aplicar el mismo enfoque para reprocesar piezas con defectos producidos durante el proceso de fabricación debido a la falta de material; en este caso, la hibridación puede ayudar a reducir el desperdicio. Debido a las características de las piezas y a las estrictas tolerancias, el número de reparaciones de estas piezas puede ser bastante elevado; por ejemplo, para un nuevo producto, puede representar alrededor del 10% del tiempo total de producción y, por tanto, es un factor de coste elevado.

La fabricación total del componente por aditivo y su posterior mecanizado en una máquina híbrida es también una opción que valorar. La materia prima inicial de la carcasa (que son geometrías cónicas de Inconel 718) tiene un plazo de entrega muy elevado por parte del suministrador y el espesor final de diversas secciones del componente es de unos pocos milímetros por lo que la mayoría del material debe ser extraído por mecanizado para obtener todos los detalles geométricos. En este sentido, la fabricación del componente por aporte láser

permite obtener una geometría más cercana a la del componente final ahorrando material y tiempo de mecanizado.

Por tanto, las posibilidades planteadas dentro del proceso de aporte láser para este componente son la reparación de defectos producidos durante la fabricación, fabricación de detalles y la fabricación de la carcasa completa.

2 Definición del caso de uso

El caso de uso propuesto es la fabricación por aporte láser DED de un componente que emula una carcasa de una turbina aeronáutica de baja presión (Figura V-1), empleando Inconel 718. Este material ha sido seleccionado ya que es con el que habitualmente se fabrica este componente debido a sus excelentes propiedades en entornos a altas temperaturas.

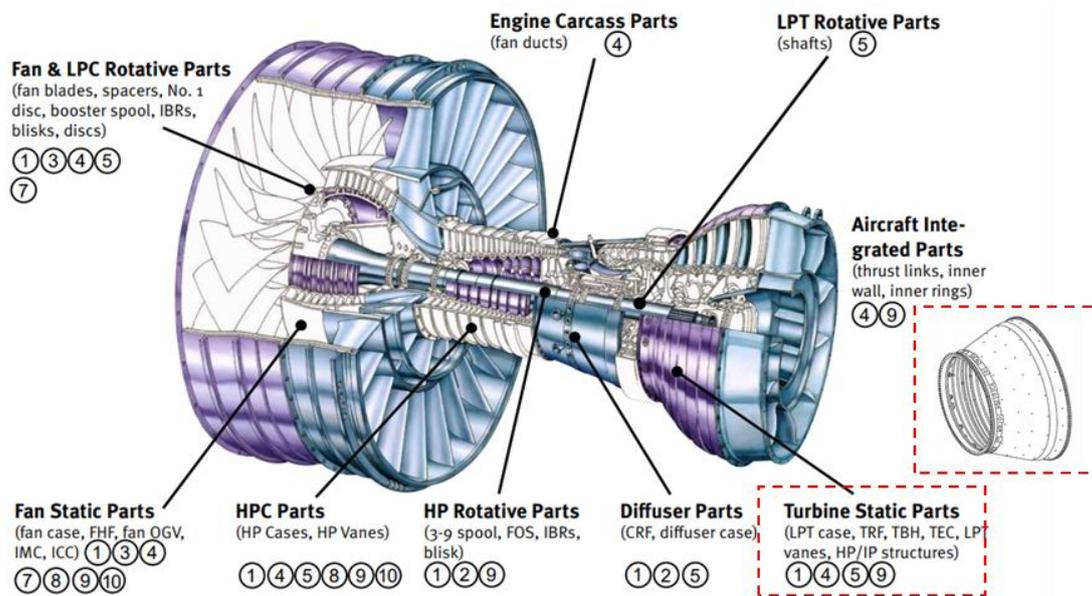


Figura V-1. Imagen de una turbina de avión. Marcado en rojo la carcasa de la turbina de baja presión y su disposición en el conjunto total de la turbina. Imagen obtenida del catálogo de productos de la empresa [GKN aerospace, 2020].

El diseño de esta pieza test presenta una suma de detalles geométricos característicos de estos componentes dentro de una geometría de revolución (Figura V-2) debido a que, dependiendo del modelo, estos componentes presentan detalles geométricos distintos.

Hay que tener en cuenta que para obtener la geometría propuesta en la Figura V-2 en la máquina híbrida de Ibarria, es necesario aportar sobre un sustrato apoyado en el divisor vertical de la mesa de la máquina. El modelo de máquina híbrida que se ha empleado carece de la configuración cinemática que le permite inclinar la mesa del divisor vertical por lo que para fabricar este componente hay solo dos opciones: con el cabezal recto o inclinado sobre sustrato horizontal. Tal

y como se ha visto en el estudio experimental del Capítulo III, ambas posibilidades difieren en el desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX) que se puede alcanzar, siendo mayor con el cabezal inclinado. A mayor ΔX , pueden alcanzarse mayores tasas de material por hora. Tal y como se ha desarrollado en el Capítulo IV de este trabajo, la metodología desarrollada establece que para el caso de aporte de material con cabezal inclinado es necesario emplear la boquilla de 4 vías frente a la continua para obtener tasas de aporte superiores a $0,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

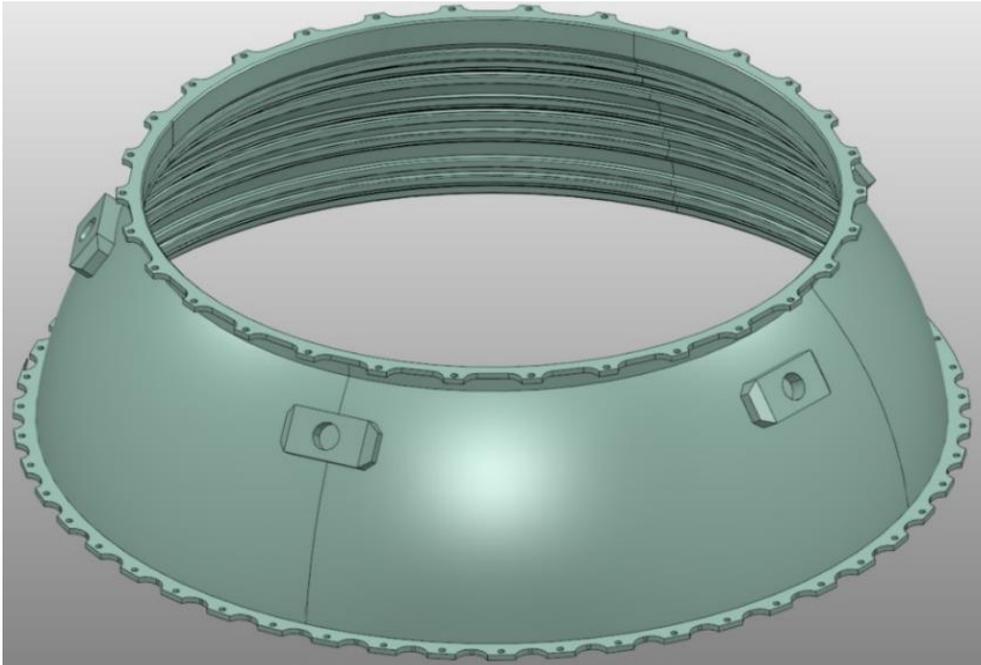


Figura V-2. Diseño de la pieza test emulando una carcasa de una turbina de baja presión.

En primer lugar, se plantea la fabricación de la preforma de la carcasa. Para ello, un primer paso es la adaptación del diseño del componente considerando las restricciones del proceso de aporte por láser. Así, es necesario tener en cuenta que el cabezal láser no puede ser inclinado más de 45° y que tampoco se puede voltear la mesa de trabajo, por lo que es necesario trabajar sobre un sustrato horizontal. Este hecho impide fabricar directamente todas las geometrías presentes en el diseño original de la carcasa planteada, como por ejemplo estructuras rectas con secciones a 90° (Figura V-3.a). De esta forma, estas geometrías deben de ser sustituidas por preformas de estructuras de sección variable (Figura V-3.b) que permitan obtener la geometría objetivo tras el proceso de mecanizado. Al ser una geometría de revolución, la preforma se obtiene envolviendo su sección (Figura V-4).

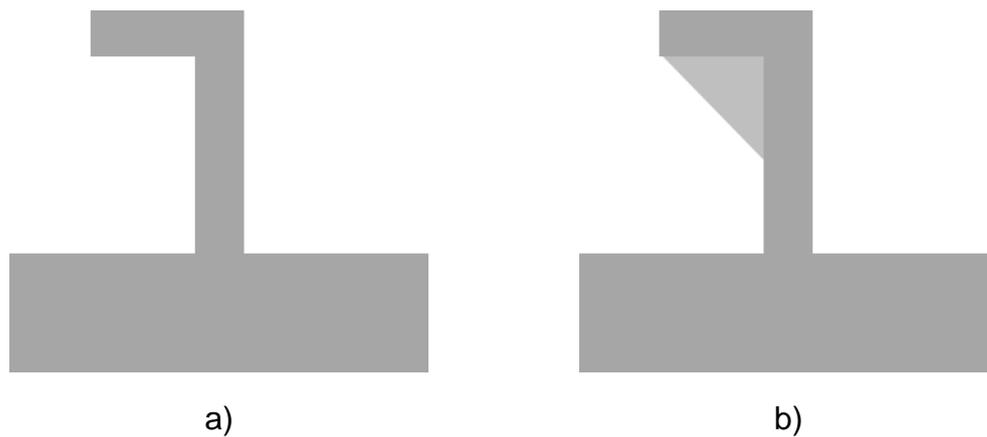


Figura V-3. Preforma para obtener la geometría tras mecanizar: a) Geometría objetivo; b) Preforma para la obtención de la geometría tras el mecanizado.

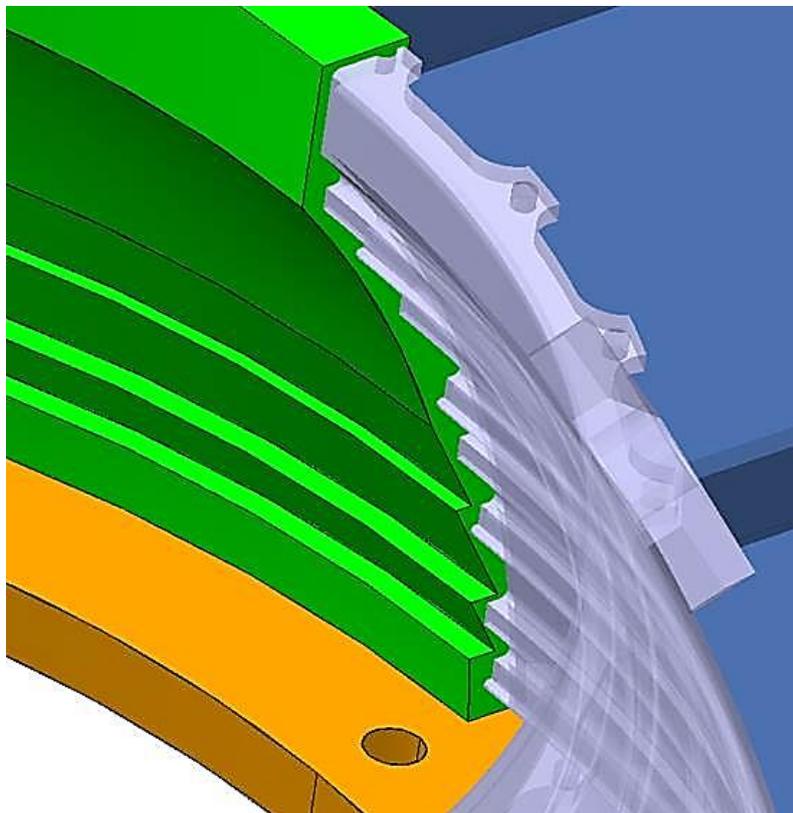


Figura V-4. Imagen de la preforma que contiene la geometría total de la pieza test.

Al ser un componente de revolución, la mayor complejidad geométrica de la preforma se encuentra en su sección debido a que es la suma de distintas geometrías de sección variable y presenta una inclinación mínima de pared (θ) de 49° (Figura V-5.a). Así pues, se ha diseñado una pared con la misma sección que la preforma de la carcasa como geometría de validación (Figura V-5). Esto permite validar de forma más rápida y eficiente la estrategia, ya que se aporta mucho menos material que fabricando la preforma completa. Además, permite estimar el tiempo de fabricación del componente entero, extrapolando para ello

el tiempo de fabricación de la pared mediante la longitud de esta y el perímetro de la preforma de revolución.

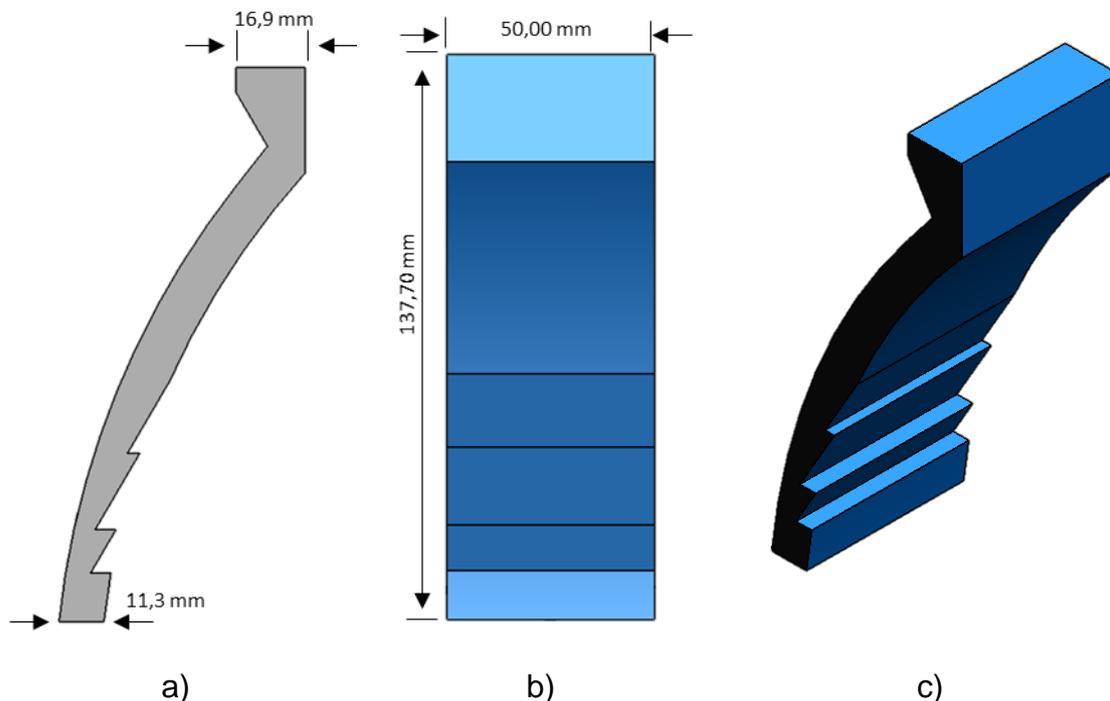


Figura V-5. Detalle del CAD de la preforma para la validación de la estrategia y los parámetros: a) Perfil y dimensiones; b) Frontal y dimensiones; c) Vista de la pared.

Para la realización de esta geometría se ha aplicado el algoritmo y las estrategias desarrolladas en el Capítulo anterior. Así, se ha generado un programa en lenguaje de código abierto Python para generar las trayectorias de aporte. De esta forma, este caso concreto sirve de validación final tanto del modelo, como del algoritmo y estrategias que se han desarrollado en esta tesis.

3 Fabricación de la preforma y resultados

El paso inicial para obtener las trayectorias de aporte de la preforma es dividir la geometría en distintas partes. Esta división se hace en función de dos criterios:

- Las ecuaciones del perfil: El programa desarrollado en lenguaje de código abierto Python genera las trayectorias de aporte en función de las ecuaciones del perfil a fabricar. Para ello, las ecuaciones de cada sección deben introducirse individualmente. El algoritmo del programa emplea estas ecuaciones para generar una estrategia de aporte en función de los 4 casos que plantea según la sección de la geometría.
- El desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX) en función del ángulo alcanzado por la geometría (θ): El desplazamiento horizontal máximo por capa es un valor experimental que define un límite a partir del cual se presentan distorsiones geométricas en la geometría aportada. El valor

máximo de ΔX determina el desplazamiento vertical máximo ΔZ en función del ángulo de la geometría, por lo que define la máxima altura de capa de cada trayectoria. Para este criterio, se ha definido un valor máximo de ΔX de 0.58 mm ya que es el máximo empleado en las validaciones del Capítulo IV.

Por lo tanto, al dividir la sección según las ecuaciones del perfil, la geometría se divide en 8 trayectorias distintas (Figura V-6):

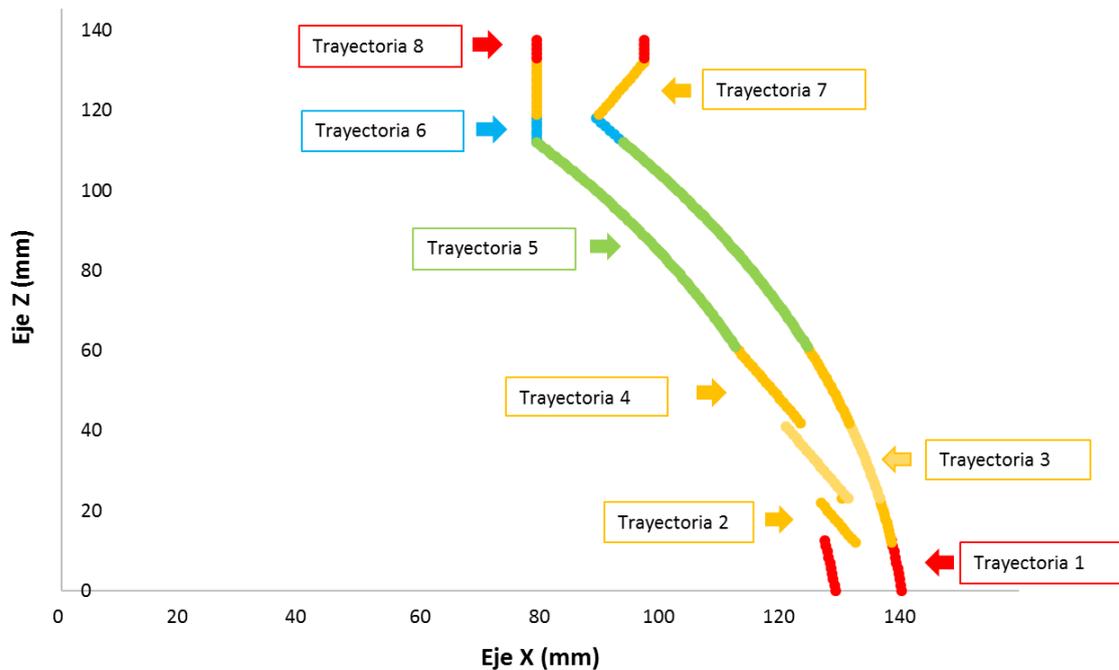


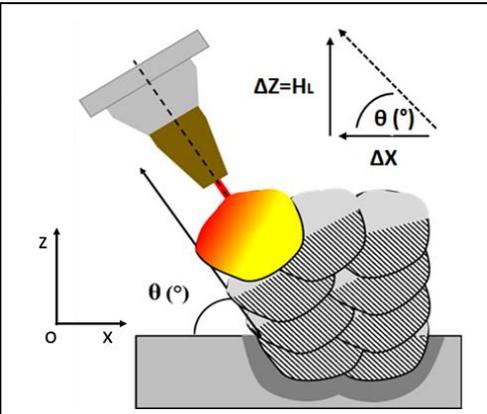
Figura V-6. Trayectorias en que se divide la preforma según las ecuaciones del perfil.

Así pues, la división de la sección de la preforma en distintas trayectorias es simple, ya que en cada una de ellas las ecuaciones del perfil son distintas. Esto es debido a que la preforma recubre todos los detalles (railes y rebordes) del perfil de la pieza test por lo que la sección no presenta una ecuación continua del perfil.

Sin embargo, teniendo en cuenta el desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX) en función del ángulo alcanzado por la geometría (θ), la trayectoria 5 se divide en 3 partes. Según este criterio, el desplazamiento horizontal máximo por capa (ΔX) y el ángulo alcanzado por la geometría (θ) definen el desplazamiento vertical (ΔZ) necesario para mantener el ángulo. Por tanto, este valor de ΔZ es la altura de capa (H_L) máxima posible para mantener el ángulo durante la fabricación de la geometría. Por lo tanto, los parámetros del proceso deben adaptarse para no superar la altura de capa máxima en función del ángulo y del ΔX máximo establecido (Tabla V-1).

Tabla V-1. Altura de capa máxima (H_L) en función del ángulo (θ) para el desplazamiento horizontal máximo (ΔX) seleccionado

θ ($^\circ$)	ΔX máximo (mm)	$\Delta Z=H_L$ máxima (mm)
90	0,58	Sin límite máximo
80	0,58	3,29
70	0,58	1,59
60	0,58	1
50	0,58	0,69



Por lo tanto, a menor ángulo de la pared, menor debe ser la altura de capa. Así pues, para no superar el valor límite de H_L , es necesario la adaptación de los parámetros del proceso de aporte. Como consecuencia, el cordón que forma la capa debe ser de menor tamaño a menor ángulo de pared. Esto no solo tiene consecuencias en la geometría del cordón, sino también en la eficiencia del proceso.

Para seleccionar los parámetros de aporte en función de la H_L máxima se emplea el modelo geométrico del Capítulo IV, lo cual permite valorar diferentes combinaciones de parámetros. La Tabla V-2 muestra los parámetros principales de aporte seleccionados para cada ΔZ de la Tabla V-1, así como la eficiencia del aporte (η) según las ecuaciones del cordón simple y la altura de capa obtenida por el modelo para un porcentaje de solapamiento (d_o) del 50%.

Tabla V-2. Parámetros del proceso para cada condición de la geometría de la pared. H_L es la altura de capa estimada por el modelo en esas condiciones de aporte y con un d_o del 50%.

Condiciones de Aporte	P (W)	v (mm·min ⁻¹)	\dot{m}_p (g·min ⁻¹)	η (%)	H_L (mm)
Condición 1: $\Delta Z < 3.29$ mm	2500	500	16	61	1,5
Condición 2: $\Delta Z < 1.59$ mm	2500	600	16	59	1
Condición 3: $\Delta Z < 1$ mm	2500	750	16	57	0,72
Condición 4: $\Delta Z < 0.69$ mm	2100	850	13	52	0,63

De esta manera, la condición 1 se emplea en un ángulo de pared θ con un valor en el rango entre 90° y 70° , la condición 2 en el rango entre 70° y 60° , la condición 3 en el rango entre 60° y 55° , y la condición 4 en el rango entre 55° y 50° . Por lo tanto, para optimizar la eficiencia del proceso se deben emplear las condiciones más eficientes en las secciones que lo permitan.

Debido a que la sección de la preforma que corresponde a la trayectoria 5 está definida en ambos extremos por ecuaciones polinómicas de segundo grado y no

lineales, el ángulo (θ) no es un valor constante, sino que disminuye a mayor altura. Así pues, θ evoluciona de un valor inicial de 65° a 49° . Antes que emplear la condición 4, la cual corresponde al menor ángulo de la trayectoria 5, se divide la trayectoria en tres partes. De esta manera es posible emplear condiciones de aporte de mayor eficiencia en las partes que lo permitan. Por lo que finalmente, se han generado 10 trayectorias en vez de 8. La Figura V-8 muestra las trayectorias finales y las marca por colores según la condición de aporte que se aplica para cada una. Así pues, a la condición 1 le corresponde el rojo, naranja a la condición 2, verde a la condición 3 y azul a la condición 4.

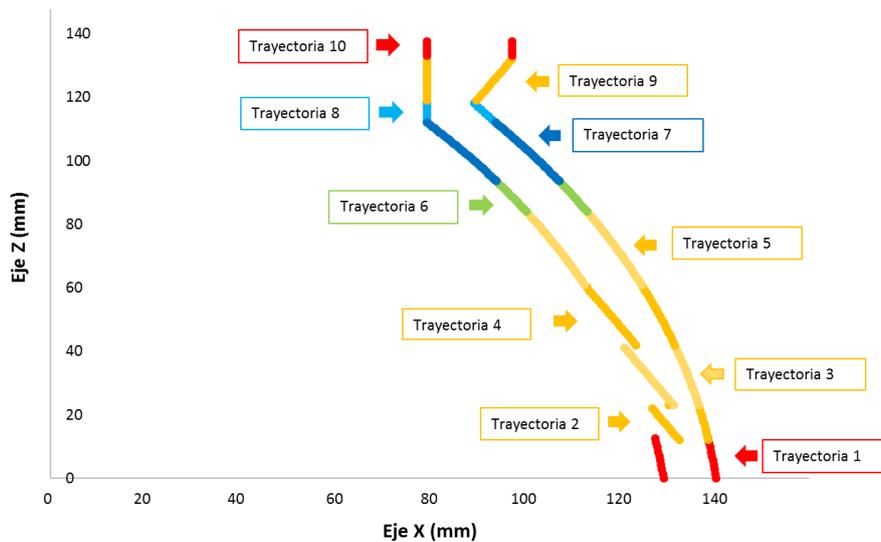


Figura V-7. Trayectorias en que se divide la preforma según las ecuaciones del perfil y las condiciones de aporte.

En cuanto a la estrategia empleada en cada trayectoria, la preforma contiene 3 de los 4 casos posibles comentados en el Capítulo IV (Figura V-8).

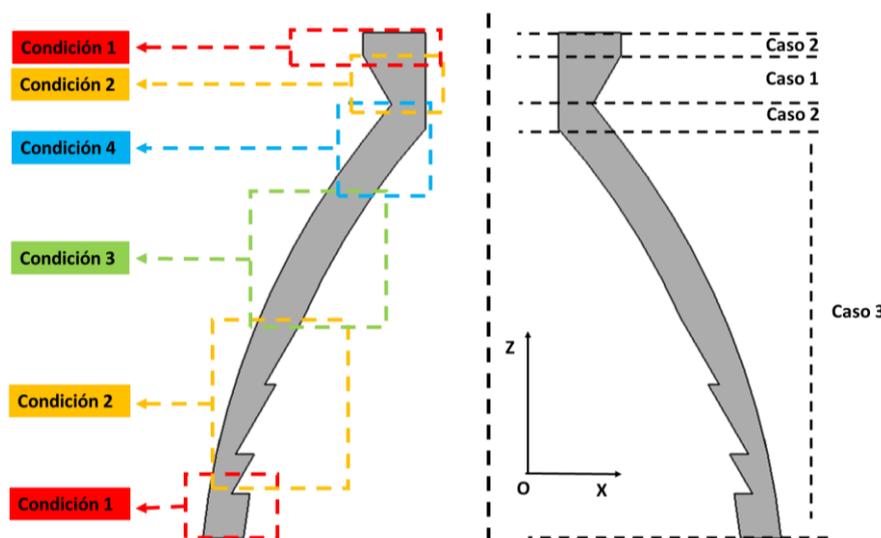


Figura V-8. Geometría en función de los parámetros del proceso y del tipo de caso según la estrategia de aporte.

En la Figura V-9 se muestra la estrategia empleada para cada caso en que el algoritmo divide las estrategias de aporte de la preforma.

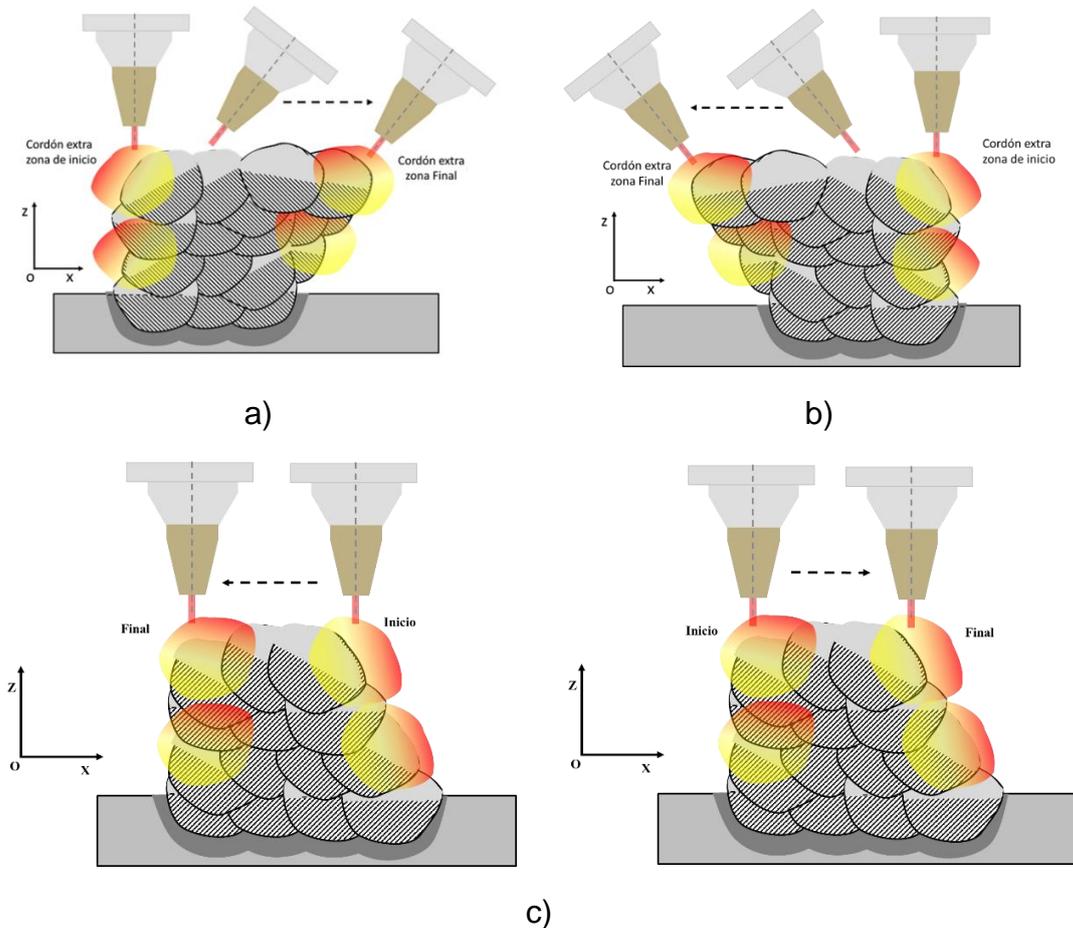


Figura V-9. Esquema de las trayectorias de los distintos casos que componen la pared: a) Caso 1; b) Caso 3; c) Caso 2. En el caso 2 hay dos posibilidades ya que no importa el extremo de inicio de la trayectoria.

En los casos 1 y 3 (Figura V-9.a y b) el primer cordón de cada capa se aporta con el cabezal verticalmente mientras que en el resto se inclina. En el caso 2 no es necesario inclinar el cabezal para evitar distorsiones geométricas, aunque es posible establecer una lógica similar a los casos 1 y 3 inclinando el cabezal en la dirección de avance del aporte si se considera necesario. En el caso 2 (Figura V-9.c) no importa el extremo de inicio pudiendo escogerse el que mejor convenga en función de otros criterios.

La pared obtenida tras el proceso de aporte (Figura V-10) presenta un buen crecimiento y una geometría similar a la geometría objetivo (Figura V-11).



Figura V-10. Fabricación del perfil mediante aporte láser.



a)



b)

Figura V-11. Geometría final: a) Geometría final; b) Perfil final.

La geometría final ha sido escaneada mediante luz estructurada mediante un escáner PhoXi 3D de la empresa Photoneo con una precisión de calibración de 25 micras y una distancia entre puntos de medición de 57 micras (Figura V-12). Esta geometría ha sido comparada con el CAD teórico empleando el software GOM inspect.

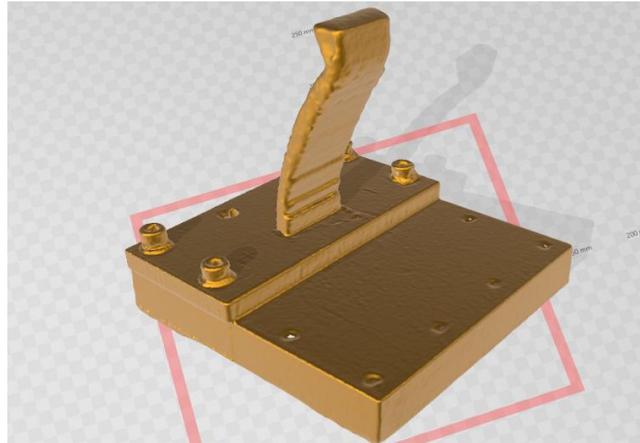


Figura V-12. CAD de la geometría escaneada.

Al comparar ambas geometrías (CAD teórico y CAD escaneado) se ha comprobado que los extremos de la pared presentan distorsiones que reducen el material aportado hasta en 2 mm en las zonas de mayor ángulo de inclinación (Figura V-13). Esto es debido a un ΔX excesivo para las condiciones de aporte empleadas (Condición 4), lo cual genera una pérdida progresiva de material aportado. Por tanto, en el caso de que la geometría final fuera una pared, sería necesario reducir ΔX y replantear los parámetros del proceso de la condición 4 para esa zona de aporte. Dado que la aplicación final es una geometría de revolución, esta no presenta bordes en los cuales se pueda distorsionar la forma por lo que la información más relevante para determinar la validez de los parámetros y la estrategia de aporte está en la sección transversal de la pared (Figura V-14).

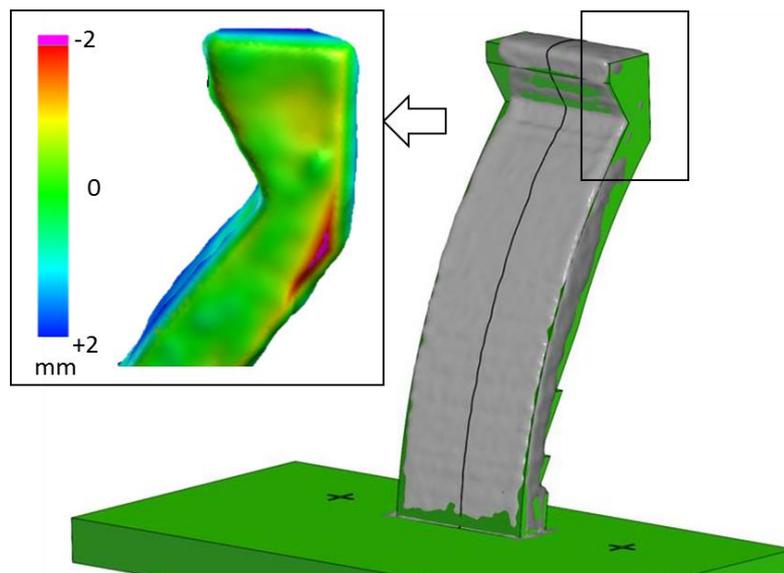


Figura V-13. Comparación de la geometría escaneada con el CAD teórico y detalle del borde de la pared. En el detalle del borde el rango de valores negativos representa falta de material. El rango de valores positivos señala áreas con demasiada con respecto al CAD teórico.

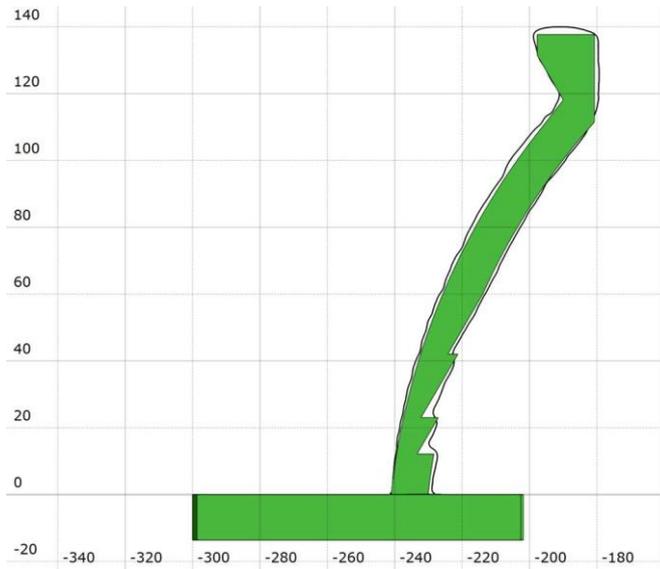


Figura V-14. Eje vertical y horizontal con unidades en mm. Comparación de la sección transversal de la preforma fabricada (Línea negra) con el del CAD teórico (en verde).

Aunque la sección transversal analizada presenta una geometría próxima a la geometría objetivo, muestra distorsiones en las aristas teóricas (Figura V-14) que plantean generar preformas con radios definidos en las aristas. Analizando el histograma de las distorsiones de la geometría real con el CAD teórico se manifiesta el incremento de la anchura de la pared al igual que en los casos de validación del Capítulo IV. Este incremento presenta un valor central de 0.80 mm de demasía (Figura V-15). Por lo que, aunque es necesario desarrollar radios en las aristas de la sección de la preforma y redefinir los parámetros de la condición 4 para obtener menores distorsiones, se puede concluir como validados tanto modelo como el algoritmo y la estrategia de aporte en esta estructura.

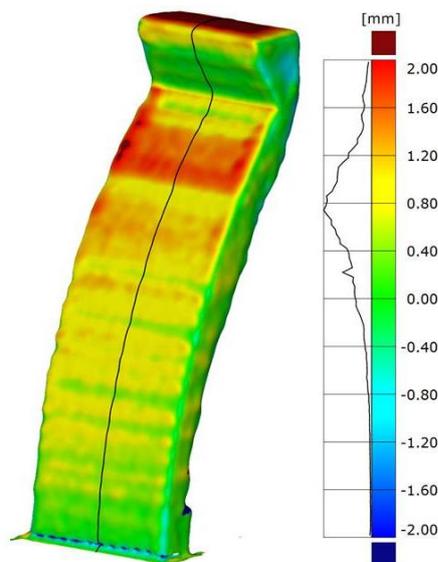


Figura V-15. Histograma de desviaciones. Los valores positivos representan demasía de material. Los valores negativos representan falta de material.

Esta geometría ha sido también mecanizada para comprobar faltas de llenado o defectos graves a nivel macroscópico. Primeramente, se ha realizado un corte por chorro abrasivo de agua para obtener la sección transversal y posteriormente se ha mecanizado una cara por fresado. El área, tanto cortada como mecanizada, no presenta defectos visibles (Figura V-16).



Figura V-16. Imagen de la geometría tras el proceso de corte por agua y mecanizado. No se perciben defectos.

4 Conclusiones

En este capítulo se ha planteado la validación del modelo geométrico desarrollado para el proceso de aporte por láser de Inconel 718, así como la validación del algoritmo y de la estrategia para la fabricación de geometrías de sección variable.

El modelo geométrico desarrollado, permite obtener los parámetros del proceso en función de los límites geométricos de cada geometría. Por lo tanto, este modelo se puede emplear para determinar los parámetros en función de la altura de capa máxima necesaria en función del valor experimental límite del desplazamiento horizontal y del ángulo de pared.

El algoritmo y la estrategia desarrollados en esta tesis han sido validados en las 10 trayectorias generadas. De todas formas, es necesario implementar sistemas de monitorización y control para obtener una mayor precisión dimensional, así como para reducir la ondulación del contorno. Por otro lado, es necesario abordar ciertas mejoras antes de fabricar la preforma de revolución completa. En concreto, es necesario establecer radios de redondeo en las aristas vivas del CAD de la sección y optimizar los parámetros empleados en las zonas de menor ángulo de la geometría debido a las distorsiones geométricas obtenidas.

CAPÍTULO VI

CAPÍTULO VI: APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

1 Aportaciones

En el presente trabajo de Tesis Doctoral se ha desarrollado y validado una metodología para la fabricación de componentes mediante el proceso de fabricación aditiva láser DED. Para ello, el método se basa en un modelo geométrico y en la aplicación de una serie de estrategias de aporte para distintos casos del proceso de aporte láser. La metodología se ha desarrollado fundamentalmente para su aplicación con polvo de Inconel 718 basándose en los resultados de una serie de estudios experimentales del proceso. De este modo, las principales aportaciones del presente trabajo de investigación pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

1- Optimización de parámetros del proceso

Como parte del estudio experimental del Capítulo III, se ha obtenido una ventana de parámetros de proceso optimizados en función de la calidad, eficiencia y productividad respecto de los parámetros principales del proceso (potencia, velocidad y flujo de polvo). Para la obtención de esta ventana se han establecido previamente otra serie de parámetros secundarios con el fin de reducir el número de parámetros de estudio durante la caracterización del proceso. Estos parámetros secundarios son el tiempo de espera antes de iniciar el proceso de aporte, diámetro del spot láser, distancia de aporte y caudal del gas de arrastre y de protección. El método se ha empleado sobre dos tipos de boquillas de aporte: Boquilla coaxial discreta de 4 vías y boquilla coaxial continua, siendo válido en ambos casos. De esta forma, la metodología desarrollada sería extrapolable a cualquier sistema de polvo láser DED.

2- Modelo del cordón simple

Partiendo de los datos obtenidos experimentalmente sobre las características del cordón aportado en la optimización de parámetros del proceso (altura, anchura, área y penetración), se ha desarrollado un modelo de la geometría de la sección del cordón simple dentro del rango de parámetros estudiados en este trabajo. Este modelo ha sido validado con las macrografías de las secciones transversales de los cordones estudiados.

3- Ecuaciones de las características principales del proceso de aporte

Se han obtenido las ecuaciones de las características del cordón simple, tanto geométricas (altura, anchura, área, penetración y dilución) como de proceso (eficiencia, productividad y tasa de deposición), en función de las características

principales del proceso. Estas ecuaciones nutren tanto el modelo del cordón simple como el modelo geométrico del cordón solapado desarrollados en este trabajo y permiten determinar cuál es la influencia de cada parámetro en las características, tanto del cordón simple como en recubrimientos.

4- Análisis de la influencia de la inclinación y la gravedad en el proceso de aporte

Se ha determinado experimentalmente los efectos de la inclinación y la gravedad no solo en el cordón individual sino también en paredes con diferentes inclinaciones. Esto ha permitido obtener las variaciones de las características del cordón simple con la inclinación tanto del sustrato como de la boquilla. También se ha determinado la estrategia de fabricación más eficiente y productiva de las boquillas comprobadas en la fabricación de paredes inclinadas. También se han establecido límites geométricos y reglas de fabricación en función del desplazamiento horizontal entre capas y la estrategia de aporte.

5- Modelo geométrico del cordón solapado (recubrimientos)

Se ha desarrollado un modelo de la sección transversal del cordón solapado, tanto del material aportado como de la dilución con el sustrato, que ha sido validado tanto para Inconel 718 como para la aleación base hierro Eutroloy 16606A.04. Este modelo se nutre de las características del cordón individual y por tanto en última instancia de las ecuaciones obtenidas en el estudio experimental. Esto permite obtener un modelo del aporte en función de la potencia, velocidad, flujo de polvo y porcentaje de solapamiento entre cordones. Sumando los resultados del estudio de los efectos de la inclinación y la gravedad en el proceso de aporte se ha obtenido el modelo también en función del ángulo de inclinación. Este modelo es útil para seleccionar los parámetros según los requisitos dimensionales del recubrimiento, como el espesor efectivo, la dilución y la altura de la capa, y para seleccionar la estrategia de mecanizado posterior que se basa en la geometría prevista aportada.

6- Estrategias de aporte para estructuras rectas de sección constante

Según los datos obtenidos por el modelo geométrico se ha desarrollado una estrategia de aporte basada en cordones extra en los extremos para un crecimiento de capa estable. Estos cordones presentan un avance que puede ser distinto al del resto de cordones en función de la cantidad del material necesario para un correcto crecimiento.

7- Estrategias de aporte para estructuras multicapa de sección variable

Además de lo comentado en las estrategias de aporte para estructuras rectas de sección constante, se ha desarrollado una estrategia de aporte con solapamiento

variable por capa dentro de un rango establecido para adaptarse a la geometría de estructuras multicapa de sección variable. Esta estrategia parte también de los datos del modelo geométrico.

8- Algoritmo adaptativo a la sección de la estructura

Se ha desarrollado un algoritmo para las estrategias de aporte en estructuras multicapa de sección variable. Partiendo de las características del cordón simple y de las ecuaciones de los extremos del perfil de la estructura, el algoritmo calcula el número de cordones y el solapamiento en cada capa dentro de un rango especificado de solapamiento (40 a 60%) para generar la trayectoria. El algoritmo también divide las geometrías en 4 casos adaptando la estrategia de aporte a cada uno.

9- Validación

Se ha validado tanto el modelo geométrico como las estrategias y el algoritmo en aporte láser DED sobre sustrato horizontal fabricando una preforma de sección compleja correspondiente a la preforma de la carcasa de una turbina. Para ello, se ha dividido el proceso de fabricación en 10 trayectorias adaptando los parámetros del proceso a la altura de capa necesaria para obtener la geometría y a la estrategia de aporte empleada.

Con los resultados de este trabajo de investigación, se han realizado 9 publicaciones en diferentes revistas científicas y 2 ponencias en congresos internacionales.

Publicaciones como autor principal:

- ✓ Ramiro, P., Alberdi, A., Ortiz, M. et al. (2018). Characteristics of Fe-, Ni- and Co-based powder coatings fabricated by laser metal deposition without preheating the base material. *Procedia CIRP* 68: 381-386. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.099>
- ✓ Ramiro, P., Ortiz, M., Alberdi, A. et al (2018). Optimization of the efficiency of the laser metal deposition process applied to high hardness coatings by the analysis of different types of coaxial nozzles. *DYNA*, 93(6). 613-619. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8836>
- ✓ Ramiro, P., Ortiz, M., Alberdi, A. et al. (2018). Characteristics of Fe-based powder coatings fabricated by laser metal deposition with annular and four stream nozzles. *Procedia CIRP*, 74, 201-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.094>
- ✓ Ramiro-Castro, P.; Ortiz, M.; Alberdi, A.; Lamikiz, A. (2020). Effects of Gravity and Non-Perpendicularity during Powder-Fed Directed Energy

Deposition of Ni-Based Alloy 718 through Two Types of Coaxial Nozzle. *Metals*, 10, 560. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10050560>

- ✓ Ramiro, P., Ortiz, M., Alberdi, A.; Lamikiz, A. (2020). Geometrical Model and Strategy in Single and Multilayer Structures Deposited by Powder-fed Directed Energy Deposition. *Procedia CIRP*, 94, 352-356, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.144>.
- ✓ Ramiro-Castro, P.; Ortiz, M.; Alberdi, A.; Lamikiz, A. (2020). Strategy Development for the Manufacturing of Multilayered Structures of Variable Thickness of Ni-Based Alloy 718 by Powder-fed Directed Energy Deposition. *Metals*, 10, 1280. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10101280>

Como Co-autor:

- ✓ Ostra, T., Alonso, U., Veiga, F. et al. (2019). Analysis of the Machining Process of Inconel 718 Parts Manufactured by Laser Metal Deposition. *Materials*, 12 (13), 2159. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12132159>.
- ✓ Alberdi, A., Alberdi, N., Pacheco, R. et al. (2019). Egituraturiko argiaren aplikazioak fabrikazio hibridoaren bidez pieza metalikoak ekoizteko. *Ekaia*, ale berezia 2019, 31-44. DOI: <https://doi.org/10.1387/ekaia.19829>.
- ✓ Artaza, T., Ramiro, P., Ortiz, M. et al. (2019). Effects of the Nozzle Tip Clogging and the Scanning Direction on the Deposition Process During Laser Metal Deposition of Alloy 718 Using a Four-Stream Discrete Nozzle. *Procedia Manufacturing*, 41, 264-271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.055>

Ponencias en congresos internacionales:

- ✓ ISEM 2018: CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining. *Characteristics of Fe-, Ni- and Co-based powder coatings fabricated by laser metal deposition without preheating the base material*.
- ✓ LANE 2020: CIRP Conference on Photonic Technologies. *Geometrical Model and Strategy in Single and Multilayer Structures Deposited by Powder-fed Directed Energy Deposition*.

2 Líneas futuras

La presente investigación abre nuevas líneas de interés para futuros trabajos de investigación entre los cuales destacan:

- Extender el modelo y la estrategia desarrollados a otros materiales, geometrías y rango de parámetros. Como por ejemplo en planos inclinados con un mayor rango de ángulos al estudiado (Figura VI-1), geometrías de revolución (Figura VI-2) o condiciones de baja potencia para la reparación de carcasas de turbinas de baja presión y fabricación de detalles (Figura VI-3).

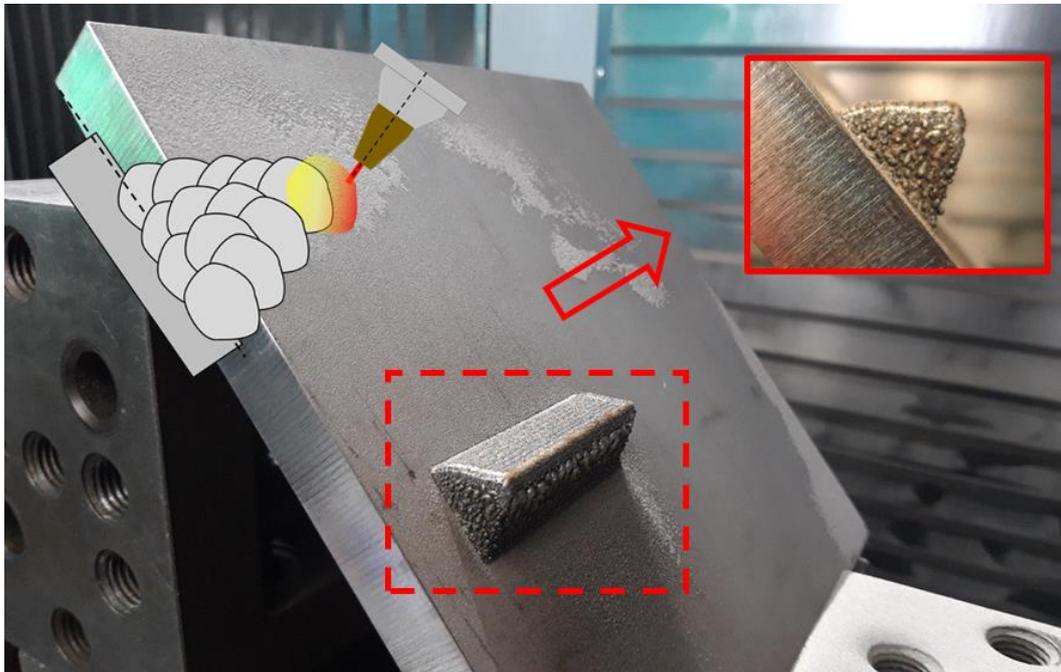


Figura VI-1. Geometría aportada en plano inclinado a 51° respecto de la horizontal.



Figura VI-2. Geometría de revolución y detalle aportado a 60° respecto de la horizontal.

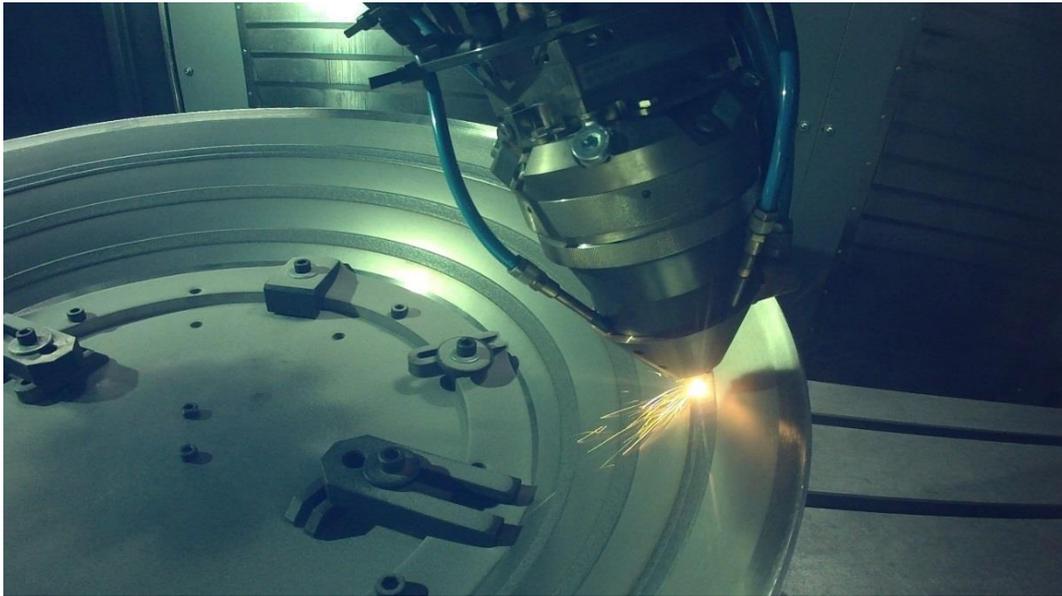


Figura VI-3. Proceso de aporte en condiciones de baja potencia para reparación y fabricación de detalles por aditivo en carcasas de turbinas de baja presión.

- Implementar las ecuaciones del cordón simple, el modelo geométrico, el algoritmo y las estrategias de fabricación en un sistema de CAM para calcular la trayectoria del proceso de aporte láser, la geometría esperada del material aportado y la trayectoria del posterior proceso de mecanizado. De esta manera, se puede facilitar el trabajo del sistema de control y establecer rápidamente la geometría esperada y la mejor estrategia de aporte como complemento de los modelos numéricos de transferencia de calor y flujo en el proceso DED.
- Mejorar los parámetros del proceso a fin de reducir la ondulación que se observa en las estructuras obtenidas y establecer radios de redondeos para evitar los defectos obtenidos en las aristas vivas de la sección transversal mostradas en el caso de validación.
- Optimizar la eficiencia y productividad del proceso empleando una máquina con una configuración cinemática que permita inclinar el sustrato para poder trabajar con la boquilla coaxial continua verticalmente.
- Estudiar de forma más profunda tanto la estructura obtenida en el aporte, así como las fases obtenidas y los tratamientos térmicos necesarios en el postprocesado.
- Estudiar y modelizar la influencia del flujo de polvo al alcanzar el baño fundido y su efecto en la distorsión en los bordes de la geometría al fabricar estructuras multicapa.
- Implementar el modelo en sistemas de control que permitan adaptar los parámetros de proceso rápidamente en función de las condiciones

instantáneas de proceso. Asimismo, se podría combinar esta metodología con la integración de sistemas de monitorización que alimenten al algoritmo de control con datos de proceso como el flujo másico, el tamaño del área fundida o la altura de capa.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [ADDISPACE, 2016] Diagnóstico y estudio de las oportunidades de fabricación aditiva metálico en el sector aeroespacial de la región del SUDOE (2016).
http://www.addispace.eu/gestor/recursos/uploads/imagenes/noticias/INFORME/SPANISH_diagnosticoyestudio.pdf, enero 2020.
- [Airbus, 2018] Airbus. Pronóstico global del mercado 2017-2036.
<https://www.afngrupo.com/pronostico-global-del-mercado-2017-2036/>, enero 2020.
- [Alberdi, 2019] Alberdi, A.; Alberdi, N.; Pacheco, R. et al. (2019). Egituraturiko argiaren aplikazioak fabrikazio hibridoaren bidez pieza metalikoak ekoizteko. Ekaia, ale berezia 2019, 31-44.
DOI: <https://doi.org/10.1387/ekaia.19829>.
- [AMPOWER, 2020] The impact of the COVID-19 pandemic to the Additive Manufacturing market. Ampower Report:
<https://additive-manufacturing-report.com/analysis/corona-impact/>, octubre 2020.
- [Antonov, 2017] Antonov, S.; Huo, J.; Feng, Q. et al. (2017). σ and η Phase formation in advanced polycrystalline Ni-base superalloys. Materials Science and Engineering: A, 687, 232-240.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.064>.
- [AP&C, 2020] Página web del fabricante AP&C.
<https://www.advancedpowders.com/>, diciembre 2020.
- [Arregui, 2018] Arregui, L.; Garmendia, I.; Pujana, J. et al. (2018). Study of the Geometrical Limitations Associated to the Metallic Part Manufacturing by the LMD Process. Procedia CIRP, 68, 363-368.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.096>.
- [Arrizubieta, 2017-a] Arrizubieta, J.I.; Martínez, S.; Lamikiz, A. et al. (2017). Instantaneous powder flux regulation system for Laser Metal Deposition. Journal of Manufacturing Processes, 29, 242-251.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.018>.
- [Arrizubieta, 2017-b] Arrizubieta, J.I.; Lamikiz, A.; Klocke, F.; Martínez, S.; Arntz, K.; Ukar, E. (2017). Evaluation of the relevance of melt pool

dynamics in Laser Material Deposition process modeling. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 115, 80–91.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.011>.

- [Arrizubieta, 2018] Arrizubieta, J.I.; Lamikiz, A.; Cortina, M. et al. (2018). Hardness, grainsize and porosity formation prediction on the Laser Metal Deposition of AISI 304 stainless steel. *Int. J. Mach. Tool Manufact.*, 135, 53-64.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.08.004>.
- [Artaza, 2019] Artaza, T., Ramiro, P., Ortiz, M. et al. (2019). Effects of the Nozzle Tip Clogging and the Scanning Direction on the Deposition Process During Laser Metal Deposition of Alloy 718 Using a Four-Stream Discrete Nozzle. *Procedia Manufacturing*, 41, 264-271.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.055>
- [ATI, 2020] Página web del fabricante ATI Metals.
<https://www.atimetals.com/specialtymaterials/Pages/powder-metals.aspx>, enero 2020.
- [Azarniya, 2019] Azarniya, A.; Garmendia, X.; Mirzaali, M.J. et al. (2019). Additive manufacturing of Ti–6Al–4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 804, 163-191.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.255>.
- [Bax, 2018] Bax, B.; Rajput, R.; Kellet, R. et al. (2018). Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 21, 487-494.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.002>.
- [Bayoumi, 1995] Bayoumi, M.R & Abdellatif, A.K. (1995). Effect of surface finish on fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*, 51 (5), 861-870.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(94\)00297-U](https://doi.org/10.1016/0013-7944(94)00297-U).
- [BCG, 2017] The Boston Consulting Group (2017). Get ready for industrialized Additive Manufacturing.
http://image-src.bcg.com/Images/BCG-Get-Ready-for-Industrialized-Additive-Manufacturing-Apr-2017_tcm9-154927.pdf, enero 2020.
- [Bi, 2006] Bi, G.; Gasser, A.; Wissenbach, K. et al. (2006). Identification and qualification of temperature signal for monitoring and

- control in laser cladding. *Optics and Lasers in Engineering*, 44 (12), 1348-1359.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.01.009>.
- [Boeing, 2019] Boeing. Commercial market outlook 2020–2039. <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/>, enero 2020.
- [Breuer, 2019] Breuer, H. (2019). New Process Improves Speed and Reliability. <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/additivemanufacturing/additive-manufacturing-laser-metal-deposition.html>, enero 2020.
- [Calleja, 2013] Calleja, A.; Fernández, A.; Campa, F.J. et al. (2013). Reliable Manufacturing Process in Turbine Blisks and Compressors. *Procedia Engineering*, 63, 60 – 66.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.214>
- [Calleja, 2018] Calleja, A.; Urbikain, G.; González, H. et al. (2018). Inconel®718 superalloy machinability evaluation after laser cladding additive manufacturing process. *Int J Adv Manuf Technol*, 97 (5-8), 2873-2885.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2169-5>
- [Campa, 2007] Campa, F.J.; López de Lacalle, L.N.; Lamikiz, A. et al. (2007). Selection of cutting conditions for a stable milling of flexible parts with bull-nose end mills. *Journal of Materials Processing Technology*, 191, 279–282.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.023>
- [Cárcel, 2014] Cárcel, B.; Serrano, A.; Zambrano, V.; Amigó, V.; Cárcel, A.C. Laser Cladding of TiAl Intermetallic Alloy on Ti6Al4V -Process Optimization and Properties. *Phys. Procedia* 2014, 56, 284–293,
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.173>.
- [Carroll,2015] Carroll, B.E.; Palmer, T.A.; & Beese, A.M. (2015). Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 87, 309-320,
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.
- [CARPENTER, 2020] Página web del fabricante Carpenter Additive. <https://www.carpenteradditive.com/powderrange-powders>, diciembre 2020.

- [CASTOLIN, 2019] Página web del fabricante Castolin Eutectic.
<https://www.castolin.com/es-ES>, noviembre 2019.
- [Chakraborty,2019] Chakraborty, S.S., Dutta, S. (2019). Estimation of dilution in laser cladding based on energy balance approach using regression analysis. *Sādhanā*, 44, 150.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-019-1134-9>
- [Chen, 2016] Chen, Y.; Lu, F.; Zhang, K. et al. (2016). Dendritic microstructure and hot cracking of laser additive manufactured Inconel 718 under improved base cooling. *Journal of Alloys and Compounds*, 670, 312-321.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.250>.
- [Chen, 2019] Chen, T.; Wu, W.; Li, W. et al. (2019). Laser cladding of nanoparticle TiC ceramic powder: Effects of process parameters on the quality characteristics of the coatings and its prediction model. *Optics & Laser Technology*, 116, 345-355.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.048>
- [Chew, 2017] Chew, Y.; Pang, J.; Bi, G. et al. (2017). Effects of laser cladding on fatigue performance of AISI 4340 steel in the as-clad and machine treated conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 243, 246-257.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.020>.
- [COAX, 2019] Página web de la empresa Fraunhofer IWS.
https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/COAXpowerline.html, noviembre 2019.
- [COHERENT, 2019] Página web del fabricante Coherent.
<http://lasers.coherent.com/lasers/Laser-Cladding>, noviembre 2019.
- [Cortina, 2018-a] Cortina, M.; Arrizubieta, J.I.; Ruiz, J.E. et al (2018). Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. *Materials*, 11, 2583.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11122583>
- [Cortina, 2018-b] Cortina, M.; Arrizubieta, J.I.; Ukar, E. et al. (2018). Analysis of the Influence of the Use of Cutting Fluid in Hybrid Processes of Machining and Laser Metal Deposition (LMD). *Coatings*, 8(2), 61.
DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings8020061>

- [Cortina, 2018-c] Cortina, M.; Arrizubieta, J.I.; Ruiz, J.E et al (2018). Design and Manufacturing of a Protective Nozzle for Highly Reactive Materials Processing via Laser Material Deposition. *Procedia CIRP*, 68, 387-392.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.100>.
- [Cottam, 2013] Cottam, R.; Luzin, V.; Liu, Q. et al. (2013). Stress Relief Heat Treatment for Laser Cladding Repair of Ti-6Al-4V Aircraft Components. 15th Australian Aeronautical Conference. https://www.researchgate.net/publication/316349717_Stress_Relief_Heat_Treatment_for_Laser_Cladding_Repair_of_Ti-6Al-4V_Aircraft_Components, diciembre 2019.
- [Dass, 2019] Dass, A.; Moridi, A. (2019). State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings*, 9, 418.
DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>
- [DBCH, 2019] Página web del fabricante Nittany Laser Technologies. <http://www.nittanylasertech.com/products/products/page.aspx?id=1008>, octubre 2019.
- [de Oliveira, 2005] de Oliveira, U., Ocelík, V., De Hosson, J.Th.M. (2005). Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface and Coatings Technology*, 197 (2-3), 127-136.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>.
- [Ding, 2017] Ding, Y.; Liu, R.; Yao, J. et al. (2017). Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 329, 97-108.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.018>.
- [Donachie, 2002] Donachie, M.J & Donachie, S.J. (2002). *Superalloys, A Technical Guide (Second Edition)*. ASM International.
- [Donadello, 2019] Donadello, S.; Motta, M.; Demir, A.G.; et al. (2019). Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation. *Optics and Lasers in Engineering*, 112, 136-144.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.09.012>.
- [ECHA info, 2020] European Chemicals Agency, ECHA-16-FS-05-ES. https://echa.europa.eu/documents/10162/13563/downstream_es.pdf, enero 2020.

- [Egry, 2010] Egry, I.; Ricci, E.; Novakovic, R.; Ozawa, S. (2010). Surface tension of liquid metals and alloys—Recent developments. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 159, 198–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.009>.
- [El Cheikh, 2012-a] El Cheikh, H., Courant, B., Branchu, S. et al. (2012). Direct Laser Fabrication process with coaxial powder projection of 316L steel. Geometrical characteristics and microstructure characterization of wall structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (12), 1779-1784. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.07.002>.
- [El Cheikh, 2012-b] El Cheikh, H., Courant, B., Branchu, S. et al. (2012). Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (3), 413-422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.10.014>.
- [ERASTEEL, 2019] Página web del fabricante Erasteel. <https://www.erasteel.com/technologies/powder-metallurgy-asp/>, noviembre 2019.
- [Ewald, 2018] Ewald, A.; Sassenberg, T. & Schlattmann, J. (2018). Evolutionary-based optimization strategy in a hybrid manufactured process using LMD. *Procedia CIRP*, 74, 163-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.070>.
- [Farnia, 2013] Farnia, A.; Malek Ghaini, F.; Ocelík, V. et al. Microstructural characterization of Co-based coating deposited by low power pulse laser cladding. *J Mater Sci* (2013) 48: 2714. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7069-8>
- [Farshidianfar, 2017] Farshidianfar, M.H.; Amir Khajepouhor, A.; Gerlich, A. (2017). Real-time monitoring and prediction of martensite formation and hardening depth during laser heat treatment. *Surface and Coatings Technology*, 315, 326-334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.055>.
- [Fatemi, 2017] Fatemi, A.; Molaei, R.; Sharifimehr, S. et al. (2017). Multiaxial fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V including surface finish effect. *International Journal of Fatigue*, 100 (1), 347-366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.03.044>.
- [Fauray, 2020] Fauray, G. (2020). Airlines may not recover from Covid-19 crisis for five years, says Airbus. *The Guardian*:

<https://www.theguardian.com/business/2020/apr/29/airlines-may-not-recover-from-covid-19-crisis-for-five-years-says-airbus>, octubre 2020.

- [Flores, 2019] Flores, J.; Garmendia, I. & Pujana, J. (2019). Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 101, 2111.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3124-1>
- [FLOW-3D, 2020] Página web del fabricante Flow 3D AM.
<https://www.flow3d.com/products/flow3d-am/>, diciembre 2020.
- [FlowWatch, 2019] Página web del fabricante Medicoat.
<http://www.medicoat.ch/thermische-spritzsysteme/turnkey-systems/flow-watch/>, agosto 2019.
- [FRAUNHOFER IWS, 2020] Página web de la empresa Fraunhofer IWS.
https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/COAXpowerline.html, marzo 2020.
- [FST, 2019] Página web del fabricante Flame Spray Technologies.
<https://www.fst.nl/>, diciembre 2019.
- [Garmendia, 2018] Garmendia, I.; Leunda, J.; Pujana, J. et al. (2018). In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning. *Procedia CIRP*, 68, 375-380.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.098>.
- [Garmendia, 2019] Iker Garmendia, I.; Joseba Pujana, J.; Aitzol Lamikiz, A. et al. (2019). Structured light-based height control for laser metal deposition. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 20-27.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.018>.
- [Gharbi, 2013] Gharbi, M.; Peyre, P.; Gorny, C. et al. (2013). Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (5), 791-800.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.015>.
- [GKN aerospace, 2020] Página web de la compañía GKN aerospace.
https://www.gknaerospace.com/globalassets/downloads/sweden/aes_product_key_standing_a4_screen.pdf, julio 2020.
- [GlobeNewswire, 2017] Global Oil & Gas Additive Manufacturing Market Opportunities 2017-2027 (2017). GlobeNewswire:

- <https://www.globenewswire.com/news-release/2017/11/16/1193962/0/en/Global-Oil-Gas-Additive-Manufacturing-Market-Opportunities-2017-2027.html>, enero 2020.
- [GRANUTOOLS, 2020] Página web del fabricante GranuTools. <https://granutools.com/>, enero 2020.
- [Greer, 2019] Greer, C.; Nycz, A.; Noakes, M. et al. (2019). Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 159-166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.016>.
- [Hanschmann, 2013] Hanschmann, F.; Magda, J.B.; Smith, K.D. Laser metal deposition welding of automotive parts, Patent N°. WO2014066569A1, 2013.
- [Hao, 2019] Hao, J., Meng, Q., Li, C. et al. (2019). Effects of tilt angle between laser nozzle and substrate on bead morphology in multi-axis laser cladding. *Journal of Manufacturing Processes*, (in press). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.025>.
- [HARDWEAR L.S, 2020] Página web de la empresa Hardwear Laser Surfacing. <https://www.hardwear.com.au/>, enero 2020.
- [H.C.STARCK, 2020] Página web del fabricante H.C.Starck. https://www.hcstarck.com/en/products/products_a-z.html, febrero 2020.
- [H.M.T.-a, 2020] Página web del fabricante Hybrid Manufacturing Technologies. <http://www.hybridmanutech.com/>, enero 2020.
- [H.M.T.-b, 2020] Página web del fabricante Hybrid Manufacturing Technologies. <http://www.hybridmanutech.com/hybrid-manufacturing.html>, enero 2020.
- [Hrabe, 2017] Hrabe, N.; Gnäupel-Herold, T.; Quinn, T. (2017). Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International Journal of Fatigue*, 94, (2), 202-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.022>.
- [Hofman, 2012] Hofman, J.T.; Pathiraj, B.; van Dijk, J. et al. (2012). A camera-based feedback control strategy for the laser cladding process.

- Journal of Materials Processing Technology, 212 (11), 2455-2462.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.027>.
- [HÖGANÄS, 2019] Página web del fabricante HÖGANÄS.
<https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/additive-manufacturing/3d-printing-powders/>, noviembre 2019.
- [HYBRID HSTM-a, 2018] Página web del fabricante Reichenbacher Hamuel.
<https://www.hamuel.de/en/produkte/hstm/hybrid/index.php>, abril 2018.
- [HYBRID HSTM-b, 2018] Página web del suministrador de maquinaria Multistation.
<https://www.multistation.com/en/product/hamuel-hstm-1000-hybrid/>, abril 2018.
- [ICAO, 2020] International Civil Aviation Organization (ICAO).
<https://www.icao.int/safety/Pages/COVID-19-Airport-Status.aspx>, octubre 2020.
- [INNST, 2019] Página web del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.
<https://www.insst.es/>, julio 2019.
- [INNST-AI, 2019] Página web del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. ICSC: 0988.
http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=988&p_edit=&p_version=2&p_lang=es, julio 2019.
- [Inspection 3D, 2020] Quality Inspection for 3D Printing. Siemens.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/quality-inspection-3d-printing.html>, marzo 2020
- [INTEGREX, 2019] Página web del fabricante Mazak.
<https://www.mazakusa.com/es/machines/integrex-i-400am/>, octubre 2019.
- [IPG, 2019] Página web del fabricante IPG Photonics.
<https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/>, diciembre 2019.
- [ISO 52900, 2017] ISO 52900, 2017. Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología.

- [ISO 14917, 2017] ISO 14917, 2017. Proyección térmica. Terminología, clasificación.
- [Jackson, 2018] Jackson, B. (2018). Inside aerospace additive manufacturing certification at farnborough airshow 2018. <https://3dprintingindustry.com/news/inside-aerospace-additive-manufacturing-certification-at-farnborough-airshow-2018-136614/>, enero 2020.
- [Jambor, 2017] Jambor, M.; Bokůvka, O.; Nový, F. et al. (2017). Phase Transformations in Nickel base Superalloy Inconel 718 during Cyclic Loading at High Temperature. *Production Engineering Archives*, 15, 15-18.
DOI: <http://doi.org/10.30657/pea.2017.15.04>
- [Javidi, 2008] Javidi, A.; Rieger, U. & Eichlseder, W. (2008). The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 30 (10–11), 2050-2055.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005>.
- [Jinoop, 2019] Jinoop, A.N.; Paul, C.P.; Mishra, S.K. et al. (2019). Laser Additive Manufacturing using directed energy deposition of Inconel-718 wall structures with tailored characteristics. *Vacuum*, 166, 270-278.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.05.027>.
- [Jones, 2012] Jones, J., McNutt, P., Tosi, R. et al. (2012). Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - an Additive Manufacturing Conference, 821-827.
Retrieved from <http://www.scopus.com>
- [Kaierle, 2017] Kaierle, S.; Overmeyer, L.; Alfred, I. et al (2017). Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 196-199.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>.
- [Kaminski, 2011] Kaminski, D. (2011). LASER MARKING: How to choose the best laser for your marking application. <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16562901/laser-marking-how-to-choose-the-best-laser-for-your-marking-application>, diciembre 2019.
- [Karunakaran, 2008] Karunakaran, K. P., Pushpa, V., Akula, S. B. et al. (2008). Techno-economic analysis of hybrid layered manufacturing.

International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 4 (1-2), 161-176.
DOI: <https://doi.org/10.1504/IJISTA.2008.016364>

- [Ke, 2019] Ke, D.; Vu, A.A.; Bandyopadhyay, A. et al. (2019). Compositionally graded doped hydroxyapatite coating on titanium using laser and plasma spray deposition for bone implants. *Acta Biomater*, 84, 414–423.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.11.041>
- [KEYENCE, 2019] Página web del fabricante Keyence.
https://www.keyence.com/ss/products/marketing/marketing_central/select/metalmarking.jsp, noviembre 2019.
- [Klocke, 2011] Klocke, F.; Sangermann, H.; Krämer, A. et al. (2011). Influence of a high-pressure lubricoolant supply on thermo-mechanical tool load and tool wear behaviour in the turning of aerospace materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225 (2), 52–61.
DOI: <https://doi.org/10.1177/09544054JEM2082>
- [Kono, 2018] Kono, D.; Maruhashi, A.; Yamaji, I. et al. (2018). Effects of cladding path on workpiece geometry and impact toughness in Directed Energy Deposition of 316L stainless steel. *CIRP Annals*, 67(1), 233-236.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.087>.
- [KUKA, 2020] Página web del fabricante Kuka.
<https://www.kuka.com/en-de/products/production-systems/standard-products-for-automation/laser-optics>, marzo 2020.
- [Kurz, 2001] Kurz, W.; Bezençon C. & Gäumann, M. (2001). Columnar to equiaxed transition in solidification processing, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2 (1), 185-191.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1468-6996\(01\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(01)00047-X)
- [Lamikiz, 2011] Lamikiz, A., Tabernero, I., Ukar, E. et al. (2011). Current Designs of Coaxial Nozzles for Laser Cladding. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 4, 29-36.
DOI: <https://doi.org/10.2174/2212797611104010029>.
- [LASERLINE, 2019] Página web del fabricante Laserline.
<https://www.laserline.com/en-int/high-power-diode-lasers/>, noviembre 2019.

- [LASERTEC, 2019] Página web del fabricante DMG Mori.
<https://es.dmgmori.com/productos/maquinas/additivemanufacturing/boquilla-de-polvo/lasertec-65-3d-hybrid>, noviembre 2019.
- [Lei, 2017] Lei, X., Huajun, C., Hailong, L. et al. (2017). Study on laser cladding remanufacturing process with FeCrNiCu alloy powder for thin-wall impeller blade. *Int J Adv Manuf Technol*, 90, 1383-1392.
 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9445-z>.
- [Lima, 2020] Lima, L. (2020). Coronavirus: por qué la crisis por el covid-19 está dejando al mundo sin lugares donde almacenar el petróleo. *BBC News Mundo*.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-52057994>, octubre 2020.
- [Liu, 2015] Liu, Y.; Bobek, T. & Klocke, F. (2015). Laser path calculation method on triangulated mesh for repair process on turbine parts. *Computer-Aided Design*, 66, 73-81.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.009>.
- [LN4RP NC, 2019] Página web de la empresa Sodick.
https://www.sodick.co.jp/product/tool/metal_3d_printer/special/index_en.html, octubre 2019.
- [López de Lacalle, 2000] López de Lacalle, L.N.; Pérez, J.; Llorente, J.I. et al.(2000). Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 100 (1-3),1-11.
 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00372-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00372-6).
- [Lu, 2019-a] Lu, J.Z.; Cao, J.; Lu, H.F. et al. (2019). Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 369, 228-237.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.063>.
- [Lu, 2019-b] Lu, X.; Lin, X.; Chiumenti, M. et al. (2019). Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by Directed Energy Deposition: Modelling and experimental calibration. *Additive Manufacturing*, 26, 166-179.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.001>.
- [MachineWorks, 2019] Página web de la empresa MachineWorks.
<https://www.machineworks.com/>, octubre 2019.

- [Majumdar & Manna, 2011] Majumdar, J.D. & Manna, I. (2011). Laser material processing. *International Materials Reviews*, 56 (5-6), 341-388.
DOI: <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000003>
- [Malik, 2020] Malik, D.; Manchanda, P.; Simons, T.J. et al. (2020). The impact of COVID-19 on the global petrochemical industry. McKinsey & Company.
<https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Chemicals/Our%20Insights/The%20impact%20of%20COVID%2019%20on%20the%20global%20petrochemical%20industry/The-impact-of-COVID-19-on-the-global-petrochemical-industry-v4.pdf?shouldIndex=false>, octubre 2020.
- [MEDICOAT, 2019] Página web del fabricante Medicoat.
<http://www.medicoat.com/thermal-spray-systems/powder-feeder/>, agosto 2019.
- [METCO powder, 2020] Página web del fabricante Oerlikon Metco.
<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/laser-pta-weld-overlay/>, febrero 2020.
- [METCO Press, 2020] Página web del fabricante Oerlikon Metco
<https://www.oerlikon.com/metco/en/media/press-releases-detail/39537/>, febrero 2020.
- [MIDACO Chip fan, 2019] Página web del fabricante Midaco Corporation.
<https://www.midaco-corp.com/blog/p.190814000/midacofan-unattended-chip-coolant-cleaning-for-all-cnc-machines/>, octubre 2019.
- [Millturn, 2019] Página web del fabricante WFL Millturn Technologies GMBH & CO.KG.
<https://www.wfl.at/es/tecnologias/fabricacion-con-aditivos>, septiembre 2019.
- [Möller, 2016] Möller, M., Baramsky, N., Ewald, A. et al. (2016). Evolutionary-based Design and Control of Geometry Aims for AMD-manufacturing of Ti-6Al-4V Parts. *Physics Procedia*, 83, 733-742.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.075>.
- [Mozaffari, 2013] Mozaffari, A.; Fathi, A.; Khajepour, A. et al. (2013). Optimal design of laser solid freeform fabrication system and real-time prediction of melt pool geometry using intelligent evolutionary algorithms. *Applied Soft Computing*, 13 (3), 1505-1519.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.05.031>.

- [Muralidharan, 1996] Muralidharan, B.G.; Shankar, V.; Gill, T.P.S. (1996). WELDABILITY OF INCONEL 718 - A REVIEW.. Indira Gandhi Centre for Atomic Research. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/018/29018458.pdf?r=1&r=1, noviembre 2019.
- [Nenadl, 2016] Nenadl, O.; Kuipers, W.; Koelewijn, N. et al. (2016). A versatile model for the prediction of complex geometry in 3D direct laser deposition. *Surface and Coatings Technology*, 307 (A), 292-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.090>.
- [N.I.T., 2018] Sher, D. (2018), CLAMIR process control system from NIT powers up LMD/DED 3D printing. *3dprintingmedia*. <https://www.3dprintingmedia.network/clamir-process-control-system-nit-powers-lmd-3d-printing/>, mayo 2020.
- [NITTANY, 2019] Página web del fabricante Nittany Laser Technologies. <http://www.nittanylasertech.com/>, octubre 2019.
- [NX Hybrid, 2019] Página web del fabricante DMG Mori. <https://es.dmgmori.com/productos/maquinas/additive-manufacturing/boquilla-de-polvo/lasertec-65-3d>, agosto 2019.
- [OERLIKON, 2020] <https://www.oerlikon.com/am/en/about-us/media/new-powder-feeder-ideal-for-automated-powder-fed-additive-manufacturing-and-coating-processes/>, febrero 2020.
- [Ocelík, 2010] Ocelík, V.; Furár, I. & De Hosson, J.Th.M. (2010). Microstructure and properties of laser clad coatings studied by orientation imaging microscopy. *Acta Materialia*, 58, (20), 6763-6772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.002>.
- [Ocelík, 2014] Ocelík, V.; Nenadl, O.; Palavra, A. et al. (2014). On the geometry of coating layers formed by overlap. *Surface and Coatings Technology*, 242, 54-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.018>.
- [OS-FLASH, 2019] Página web del fabricante Sodick. <https://www.sodick.com/products/metal-3d-printing/opm250l>, noviembre 2019.

- [Ostra, 2019] Ostra, T., Alonso, U., Veiga, F. et al. (2019). Analysis of the Machining Process of Inconel 718 Parts Manufactured by Laser Metal Deposition. *Materials*, 12 (13), 2159. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12132159>.
- [PARADDISE, 2016] Página web del proyecto europeo Paraddise. <https://paraddise.eu/>, febrero 2020.
- [Parimi, 2014] Parimi, L.L.; Ravi G. A.; Clark, D. et al. (2014). Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718. *Materials Characterization*, 89, 102-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.12.012>.
- [Pinkerton, 2004] Pinkerton, A.J. & Li, L. (2004). The significance of deposition point standoff variations in multiple-layer coaxial laser cladding (coaxial cladding standoff effects). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (6), 573-584, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.01.001>.
- [Polvorosa, 2017-a] Roberto Polvorosa, R.; Celaya, A.; Cerrillo, I. et al.(2017). Hay vida más allá del Inconel. *Interempresas*. <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/180628-Hay-vida-mas-alla-del-Inconel.html>, enero 2020.
- [Polvorosa, 2017-b] Polvorosa, R.; Suárez, A.; López de Lacalle, L.N. et al. (2017). Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: comparison of alloy 718 and Waspaloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 44-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.01.012>
- [PowerMill, 2019] Página web de la compañía Autodesk. <https://knowledge.autodesk.com/es/support/powermill/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ESP/PWRM-Additive/files/GUID-5B32F5CB-8DDC-475C-9450-07285615BF9E-htm.html>, octubre 2019.
- [PRAXAIR, 2020] Página web del fabricante Praxair Surface Technologies. <http://www.praxairsurfacetechologies.com/en/components-materials-and-equipment/coating-equipment/powder-feeders>, enero 2020.
- [PRECITEC, 2020] Página web del fabricante Precitec. <https://www.precitec.de/en/precitec-group-start-page/>, enero 2020.
- [Qi, 2009] Qi, H.; Azer, M. & Ritter, A. (2009). Studies of Standard Heat Treatment Effects on Microstructure and Mechanical

Properties of Laser Net Shape Manufactured INCONEL 718. Metall and Mat Trans A, 40 (10), 2410-2422.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9949-3>

- [Ramiro, 2018-a] Ramiro, P., Alberdi, A., Ortiz, M. et al. (2018). Characteristics of Fe-, Ni- and Co-based powder coatings fabricated by laser metal deposition without preheating the base material. Procedia CIRP, 68, 381-386.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.099>
- [Ramiro, 2018-b] Ramiro, P., Ortiz, M., Alberdi, A. et al. (2018). Characteristics of Fe-based powder coatings fabricated by laser metal deposition with annular and four stream nozzles. Procedia CIRP, 74, 201-205.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.094>
- [Ramiro, 2018-c] Ramiro, P.; Ortiz, M.; Alberdi, A; Lamikiz, A. (2018). Optimization of the efficiency of the laser metal deposition process applied to high hardness coatings by the analysis of different types of coaxial nozzles. DYNA, 93 (6), 613-619.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8836>
- [RAYTOOLS, 2019] Página web del fabricante RayTools.
<https://www.raytools.net/ak390-tc.html>, octubre 2019.
- [Regulin, 2020] Regulin, D.; Schneider, H.I.; Hanebuth, H.; et al. Apparatus And Method For Additive Manufacturing, Patent N°. US 2020/0038954A1, 2020.
- [Renderos, 2018] Renderos, M.; Torregaray, A.; Gutierrez-Orrantia, M.E.; et al. (2018). Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material. Materials Characterization, 134, 103-113.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.09.029>.
- [Rodrigues, 2014] Rodrigues, G.; Vanhove, H. & Duflou, J. (2014). Direct Diode Lasers for Industrial Laser Cutting: A Performance Comparison with Conventional Fiber and CO2 Technologies. Physics Procedia. 56. 901-908. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.109>.
- [Rogers, 2020] Rogers, S.; Guzman, R.; Monzon, D. (2020). Petroleum: Surviving in the post-COVID-19 era. Arthur D. Little Global: <https://www.adlittle.com/en/PetroleumPostCovid19>, octubre 2020.

- [Rottwinkel, 2014] Rottwinkel, B.; Nölke, C.; Kaieler, S. et al. (2014). Crack Repair of Single Crystal Turbine Blades Using Laser Cladding Technology. *Procedia CIRP*, 22, 263-267.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.151>.
- [Roy, 2018] Roy, T.; Lai, Q.; Abrahams, R. et al. (2018). Effect of deposition material and heat treatment on wear and rolling contact fatigue of laser cladded rails. *Wear*, 412-413, 69-81.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.001>.
- [Roy, 2019] Roy, T.; Abrahams, R.; Paradowska, A. et al. (2019). Evaluation of the mechanical properties of laser cladded hypereutectoid steel rails. *Wear*, 432–433, 202930.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202930>.
- [Salonitis, 2016] Salonitis, K.; D'Alvise, L.; Schoinochoritis, B. et al. (2016). Additive manufacturing and post-processing simulation: laser cladding followed by high speed machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 85 (9-12), 2401.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7989-y>
- [SANDVIK, 2019] Página web del fabricante Sandvik.
<https://www.materials.sandvik/en/products/metal-powder/>, octubre 2019.
- [SANDVIK_HRSA, 2019] Página web del fabricante Sandvik. Guía de aplicación para Superaleaciones termorresistentes (HRSA).
<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/es-es/c-2920-034.pdf>, octubre 2019.
- [Scott, 2018] Scott, C. (2018). Specialized Vacuum Cleaners Offer Safe Powder Removal for 3D Printers. *3Dprint.com*:
<https://3dprint.com/227130/vacuum-cleaners-offer-safe-powder-removal/>, noviembre 2019.
- [Series MU-V, 2019] Página web del fabricante Okuma.
<https://www.okuma.eu/es/productos/tecnologia/endurecimiento-por-laser-y-deposicion-de-metal-por-laser/serie-mu-v-laser-ex-3/mu-6300v-laser-ex/>, octubre 2019.
- [Siemens 840D, 2019] Página web de la empresa Siemens.
<https://new.siemens.com/om/en/markets/machinebuilding/additive-manufacturing.html>, diciembre 2019.
- [Siemens H.C., 2020] Página web de la empresa Siemens.

<https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/additivemanufacturing/additive-manufacturing-laser-metal-deposition.html>; mayo 2020.

- [Shi, 2018] Shi, W., Liu, Y., Shi, X. et al. (2018). Beam Diameter Dependence of Performance in Thick-Layer and High-Power Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V. *Materials* (Basel, Switzerland), 11 (7), 1237.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11071237>
- [Spiegel, 2020] Spiegel, R. (2020). Additive Manufacturing Growth and the Impact of COVID. *DesignNews*:
<https://www.designnews.com/3dp/additive-manufacturing-growth-and-impact-covid>, octubre 2020.
- [SPRAYENERGY, 2010] Proyecto: "Wirkungsgradsteigerung thermischer Beschichtungsanlagen durch Energiequellenkombination-SPRAYENERGY".
https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/projects/spraynergy.html, diciembre 2019.
- [Sridharan, 2019] Sridharan, N.; Cakmak, E.; Deho, R.R. Microstructure evolution during laser direct energy deposition of a novel Fe-Cr-Ni-W-B hardfacing coating. *Surf. Coat. Technol.* 2019, 358, 362–370.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.053>
- [Stadtfeld, 2016] Stadtfeld H.J; Additive manufacturing of gears, Patent N°. WO2017095785A1, 2016.
- [Stoffel, 2015] Stoffel, N.J; Placek, C.; Johnson, K.A.; Baez, H. Agricultural blades and machine parts with amorphous metal laser cladding, Patent N°. US9717176B2, 2015.
- [Sui, 2019] Sui, S.; Chen, J.; Ma, L. et al. (2019). Microstructures and stress rupture properties of pulse laser repaired Inconel 718 superalloy after different heat treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 770, 125-135.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.063>.
- [Sun, 2014] Sun, S.D.; Liu, Q.; Brandt, M. et al. (2014). Effect of laser clad repair on the fatigue behaviour of ultra-high strength AISI 4340 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 606, 46-57.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.077>.

- [Tabernero, 2011] Tabernero, I.; Lamikiz, A.; Martinez, S. et al. (2011). Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding. *Int. J. Mach. Tool Manufact.*, 51 (6), 465-470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.02.003>.
- [Tamanna, 2019] Tamanna, N.; Crouch, R. and Naher, S. (2019). Progress in numerical simulation of the laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 122, 151-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.05.026>.
- [Telasang, 2014] Telasang, G.; Majumdar, J.D.; Padmanabham, G. et al. (2014). Effect of laser parameters on microstructure and hardness of laser clad and tempered AISI H13 tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 258, 1108-1118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.023>.
- [Thayalan, 2006] Thayalan, V. & Landers, R.G. (2006). Regulation of Powder Mass Flow Rate in Gravity-Fed Powder Feeder Systems. *Journal of Manufacturing Processes*, 8 (2), 121-132. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(06\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(06)80007-1).
- [TLS, 2020] Página web del fabricante TLS Technik. <https://www.tls-technik.de/en/rad/nanotune.html>, marzo 2020.
- [TMR, 2018] Análisis del mercado por parte de la compañía Transparency Market Research. *Hybrid Additive Manufacturing Machines Market (2018)*. <https://www.transparencymarketresearch.com/hybrid-additive-manufacturing-machines-market.html>, enero 2020.
- [Toyserkani, 2004] Toyserkani, E., Khajepour, A. and Corbin, S.F. (2004). *Laser cladding*. CRC press.
- [TRUMPF, 2020] Página web del fabricante Trumpf. https://www.trumpf.com/es_ES/productos/laser/paquetes-tecnologicos/, enero 2020.
- [UNE EN 60825-1 /A2: 2002.] Norma UNE EN 60825-1 /A2: 2002. Seguridad de los productos láser. Parte 1: Clasificación del equipo, requisitos y guía de seguridad. <https://www.insst.es/>, noviembre 2019.
- [Ur Rahman, 2018] Ur Rahman, N.; Capuano, L.; Van der Meer, A. et al. (2018). Development and characterization of multilayer laser clad high speed steels. *Additive Manufacturing*, 24, 76-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.009>.

- [Urbicain, 2013] Urbicain, G.; Palacios, J.A.; Fernández, A. et al. (2013). Stability prediction maps in turning of difficult-to-cut materials. *Procedia Engineering*, 63, 514–522.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.244>
- [Wang, 2009] Wang, L.; Felicelli, S.D. & Craig, J.E. (2009). Experimental and numerical study of the LENS rapid fabrication process. *J. Manuf. Sci. Eng*, 131, 041019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3173952>
- [WC, 2019] Página web del fabricante WallColmonoy.
<https://www.wallcolmonoy.com/>, noviembre 2019.
- [Wei, 2019] Wei, H.L.; Knapp, G.L.; Mukherjee, T. et al. (2019). Three-dimensional grain growth during multi-layer printing of a nickel-based alloy Inconel 718. *Additive Manufacturing*, 25, 448-459.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.028>.
- [Xu, 2014] Xu, P.; Lin, C.; Zhou, C. et al. (2014). Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/Al₂O₃ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 238, 9-14.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.028>.
- [Yablokova, 2015] Yablokova, G.; Speirs, M.; Van Humbeeck, J. et al. (2015). Rheological behavior of β -Ti and NiTi powders produced by atomization for SLM production of open porous orthopedic implants. *Powder Technology*, 283, 199-209.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.015>.
- [Yamazaki, 2016] Yamazaki, T. (2016). Development of A hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 42, 81-86.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193>
- [Yan, 2018] Yan, L.; Zhang, Y.; Newkirk, J.W. et al. (2018). Investigation of machining coolant residue cleaning methods for Ti6Al4V part fabrication through hybrid manufacturing process. *Manufacturing Letters*, 16, 10-13.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.016>.
- [Yang Chua, 2017] Yang Chua, Z.; Ahn, I.H.; Moon, S.K. (2017). Process Monitoring and Inspection Systems in Metal Additive Manufacturing: Status and Applications. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol*, 4, 235–245.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0029-7>

- [Zhai, 2019] Zhai, Y.; Lados, D.A.; Brown, E.J. et al. (2019). Understanding the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V and Inconel 718 alloys manufactured by Laser Engineered Net Shaping. *Additive Manufacturing*, 27, 334-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.017>.
- [Zhang, 2014] Zhang, K.; Wang, S.; Liu, W. et al. (2014). Characterization of stainless steel parts by Laser Metal Deposition Shaping. *Materials & Design*, 55, 104-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.006>.
- [Zhang, 2017] Zhang, Y.; Yang, L.; Chen, T. et al. (2017). Investigation on the optimized heat treatment procedure for laser fabricated IN718 alloy. *Optics & Laser Technology*, 97, 172-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.027>.
- [Zhong, 2016] Zhong, C.; Gasser, A.; Kittel, J. et al. (2016). Improvement of material performance of Inconel 718 formed by high deposition-rate laser metal deposition. *Materials & Design*, 98, 128-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.006>.
- [Zhong, 2017] Zhong, C.; Pirch, N.; Gasser, A. et al (2017). The Influence of the Powder Stream on High-Deposition-Rate Laser Metal Deposition with Inconel 718. *Metals*, 7 (10), 443. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7100443>
- [Zhu, 2012] Zhu, G.; Li, D.; Zhang, A. et al. (2012). The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition. *Optics & Laser Technology*, 44 (2), 349-356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.07.013>.
- [Zhu, 2017] Zhu, G., Shi, S., Fu, G. et al. (2017). The influence of the substrate-inclined angle on the section size of laser cladding layers based on robot with the inside-beam powder feeding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88 (5-8), 2163-2168. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8950-4>
- [ZVH, 2019] Página web del fabricante Ibarmia. <https://www.ibarmia.com/en/today/ibarmia-emo-additive-process-thr16P>, noviembre 2019.

