

Tesis doctoral

Desarrollo de un sistema de monitorización y control para el proceso de aporte metálico por láser basado en la digitalización tridimensional de la geometría

Presentada por:

Iker Garmendia Sáez de Heredia

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la

Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea

Dirigida por:

Dr. Luis Gerardo Uriarte Ibarrola (Tekniker) y

Dr. Aitzol Lamikiz Mentxaka (UPV/EHU)

Julio de 2021

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis directores de tesis, Luisge y Aitzol por guiarme en la realización y redacción de la tesis. Quisiera mandar un agradecimiento especial a Joseba Pujana como director en los dos primeros años de mi tesis, por confiar en mí para llevar a cabo este trabajo. Sin tu dirección, consejo y ánimos en determinados momentos probablemente no hubiera llegado este momento.

Me gustaría agradecer al centro tecnológico Tekniker, por darme la oportunidad de realizar la tesis y por los medios sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible, y lo más importante, a mis compañeros de trabajo, sin duda la mejor parte de Tekniker. También al departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, primero por los conocimientos que me transmitieron en el Máster que realicé allí y segundo por la oportunidad continuar con mi formación en la realización de la tesis doctoral. Igualmente, quisiera agradecer el apoyo económico del Gobierno Vasco a través de los proyectos ADDISEND (Elkartek 2018) y ADDIECO (IHOBE) y los fondos europeos a través del proyecto ASSALA (H2020-EU CLEANSKY2).

En este punto me gustaría dar las gracias por haber tenido la suerte de tener unos padres que me hayan apoyado con mis estudios. A mi pareja, Adela, por ser la persona que más me ha ayudado y acompañado en todo momento durante este proceso, por las veces que hemos hablado de la tesis y sus ganas de entender lo que hago, por apoyarme. También a mi hermano Endika, por la comida que le tocará preparar como Chef de la familia para celebrarlo, yo pago la chuleta. Y a toda mi familia por estar siempre ahí.

No me puedo olvidar de los profesores de la infancia que te marcan y te transmiten la pasión por lo que hacen, grandes profesores como Joseba, Enrique, David o Armando.

Por último, quisiera dar las gracias a mis amigos, a las personas que he conocido jugando al fútbol, y a los compañeros de estudios que he tenido tanto en Vitoria como en Bilbao. Todos vosotros habéis hecho posible esos grandes momentos de desconexión que hacen posible la vuelta al trabajo con la energía necesaria.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Resumen

El principal objetivo de esta tesis es desarrollar una metodología robusta de monitorización y control del proceso de aporte, Laser Metal Deposition (LMD), que permita reducir el tiempo y coste de fabricación y aumente la calidad de las piezas fabricadas. Con este propósito, se plantea el desarrollo de una metodología de medición y corrección geométrica durante el proceso.

El proceso LMD cuenta con numerosos parámetros, tanto de entrada como de proceso, que influyen en el resultado de la pieza fabricada, lo que lo convierte en un proceso complejo. En ocasiones, la elección de los parámetros de entrada óptimos es el resultado de una serie de ensayos de prueba y error o de un gran número de ensayos basados en un diseño de experimentos. Sin embargo, la gran sensibilidad de las condiciones de fabricación ante pequeñas variaciones en los parámetros de entrada puede provocar que estos ensayos se alarguen en exceso, o incluso que las condiciones supuestas como adecuadas como resultado de una experimentación previa sobre una geometría simplificada no sean apropiadas en el aporte de la pieza definitiva.

Por esta razón la monitorización y el control del proceso es un aspecto necesario para garantizar la fabricabilidad y calidad las piezas fabricadas. A la vista del estado del arte presentado en la tesis, se destaca la necesidad de desarrollar nuevos controles in-situ para controlar el proceso en lazo cerrado y detectar discontinuidades en el material aportado. Esto es debido a que, aunque los módulos de monitorización ya se incorporen en la mayoría de las máquinas de fabricación aditiva comerciales, en muchos casos se trata de medidas off-line en las que la información se almacena para un posterior análisis. Es importante introducir técnicas que permitan dar robustez al proceso LMD y llegar a construir piezas fiables para su implementación en la industria. Por otro lado, las correcciones de los parámetros que afectan el resultado final deben hacerse en el momento que se está aportando material, para garantizar la integridad estructural y dimensional de los productos terminados, por lo que la monitorización y control del proceso juega un papel fundamental.

Este trabajo se ha enfocado en la monitorización geométrica del proceso, por ser un aspecto menos desarrollado que la monitorización térmica. Para ello, se ha desarrollado una metodología de digitalización basada en la proyección de luz estructurada y de corrección de la altura de aporte de la pieza de forma robusta,

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

simple e independiente de la dirección de aporte, para así aumentar la estabilidad del proceso. Algunos de los aspectos tratados son la detección y corrección de las desviaciones de altura, el control de la geometría aportada en el propio sistema de fabricación, la detección de las inestabilidades en el aporte o la minimización de la aparición de defectos internos.

La metodología desarrollada ha sido validada tanto en el proceso LMD con aporte de polvo como de hilo metálico. Las piezas fabricadas han sido digitalizadas mediante la incorporación de escáneres de medida tridimensional en el entorno de fabricación, para posteriormente aplicar variaciones sobre los parámetros de entrada del proceso, como la altura de capa, el ajuste de la posición del robot al crecimiento real de la pieza o la variación de la tasa de aporte de material en función de la altura local en cada zona de la pieza. Por último, tanto la medida de las piezas como las correcciones han sido introducidas de manera automática durante el proceso, haciendo uso de un protocolo de comunicación entre el sistema de fabricación y una aplicación informática desarrollada, garantizando así el adecuado ritmo de producción.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Índice de contenido

Agradecimientos	I
Resumen	III
Índice de contenido	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIX
Lista de acrónimos	XXI
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Aspectos generales de la fabricación aditiva metálica	1
1.2. Los procesos de fabricación aditiva metálica en la industria aeronáutica y aeroespacial	3
1.3. Barreras para superar por la fabricación aditiva metálica	7
1.4. Papel de la monitorización y control en el proceso LMD	9
1.5. Hipótesis de partida	11
1.6. Objetivos del trabajo	11
1.7. Organización de la memoria	12
Capítulo 2. Análisis del estado del arte de la monitorización y control del proceso LMD	17
2.1. Introducción	17
2.2. Aporte de material mediante Laser Metal Deposition (LMD). Principales características y parámetros fundamentales de aporte	18
2.3. Variantes del proceso de aporte por láser en función del tipo de material de aporte: LMD- P y LMD-W	23
2.4. Sistema de movimiento y generación de trayectorias LMD	30
2.5. Monitorización y control de procesos	35
2.6. Monitorización y control del proceso LMD	38
2.6.1. Monitorización y control térmico del proceso LMD	41
2.6.2. Monitorización y control de altura del proceso LMD	49
2.6.3. Digitalizado tridimensional de la geometría fabricada	59
2.7. Sistemas de monitorización y control industriales	60
2.7.1. Sistemas de monitorización y control integrables en sistemas de fabricación existentes	61
2.7.2. Sistemas de monitorización y control integrados en máquinas LMD comerciales	63

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

2.8.	Conclusiones.....	66
Capítulo 3. Equipamiento empleado para la ejecución de los ensayos experimentales 71		
3.1.	Introducción.....	71
3.2.	Descripción del sistema de aporte LMD-P.....	71
3.3.	Descripción del sistema de aporte LMD-W.....	73
3.4.	Equipamiento de monitorización y control.....	74
3.4.1.	Escáner de medida tridimensional	74
3.4.2.	Equipamiento de visión.....	78
3.5.	Protocolos de comunicación	82
3.6.	Software.....	83
3.6.1.	Generación de trayectorias CAM.....	84
3.6.2.	Monitorización y control.....	86
Capítulo 4. Estudio de la influencia de la distancia entre boquilla de aporte y pieza en el proceso LMD 87		
4.1.	Introducción.....	87
4.2.	Terminología empleada para definir el crecimiento de la pieza	87
4.3.	Influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso LMD-P	88
4.4.	Influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso LMD-W	94
4.5.	Conclusiones.....	99
Capítulo 5. Precisión en trayectoria robótica e influencia sobre el proceso LMD 103		
5.1.	Introducción.....	103
5.2.	Análisis de la precisión de trayectorias robóticas	104
5.3.	Estudio experimental de la precisión del movimiento en esquinas y efecto sobre el proceso LMD.....	105
5.4.	Conclusiones.....	110
Capítulo 6. Digitalizado tridimensional y metodologías de calibración extrínseca del sistema de medida 113		
6.1.	Introducción.....	113
6.2.	Estudio de la influencia del acabado superficial sobre la precisión del escaneo.....	114
6.3.	Metodología de calibración para configuración de escáner fijo	116
6.3.1.	Transformación de la nube de puntos a un sistema de coordenadas usuario (UCS)	116

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

6.3.2.	Transformación de la nube de puntos a un sistema de coordenadas máquina (MCS)	120
6.4.	Metodología de calibración para configuración de escáner montado en el cabezal de aporte	123
6.5.	Aplicaciones de la digitalización tridimensional de la geometría	127
6.5.1.	Comparativa de pieza fabricada contra geometría teórica en proceso	127
6.5.2.	Determinación del crecimiento de la pieza	129
6.5.3.	Digitalizado de geometría para la asistencia al mecanizado postproceso.	133
6.6.	Conclusiones	134
Capítulo 7.	Control de altura del proceso LMD	139
7.1.	Introducción	139
7.2.	Control de altura del proceso LMD basado en la selección de las capas a aportar previamente calculadas	141
7.2.1.	Metodología de control de altura basada en la selección de capas a aportar	141
7.2.2.	Análisis experimental del control de altura basado en la selección de capas a aportar	146
7.2.3.	Conclusiones	152
7.3.	Control de altura del proceso LMD basado en generación de trayectorias adaptativas	153
7.3.1.	Metodología de control de altura basado en generación de trayectorias adaptativas	154
7.3.2.	Análisis experimental del control de altura basado en la generación de trayectorias adaptativas	158
7.3.3.	Conclusiones	160
7.4.	Control de altura del proceso LMD basado en la modificación de los parámetros de proceso para el ajuste local del crecimiento de la capa	161
7.4.1.	Metodología de control de altura local basada en la variación de la tasa de aporte	163
7.4.2.	Análisis experimental del control de altura local basada en la variación de la tasa de aporte	171
7.4.3.	Conclusiones	177
7.5.	Conclusiones	178
Capítulo 8.	Conclusiones y líneas futuras	181
8.1.	Conclusiones	181
8.2.	Contribuciones científicas a revistas y congresos internacionales	182

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

8.3. Futuras líneas de trabajo	183
Bibliografía	185
Anexo 1: Structured light-based height control for laser metal deposition	195
Anexo 2: Development of an Intra-Layer Adaptive Toolpath Generation Control Procedure in the Laser Metal Wire Deposition Process	205
Anexo 3: In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning.....	221
Anexo 4: Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts.....	229

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Índice de figuras

Figura 1. Volumen de mercado de los fabricantes de equipos de fabricación aditiva metálica y previsión de crecimiento en los próximos años [1].	1
Figura 2. Tecnologías de fabricación aditiva metálica y principales fabricantes [2].	2
Figura 3. Optimización topológica de cinturón de seguridad de avión fabricado por EOS.	4
Figura 4. Porcentaje de ventas de equipos de FA metálica clasificado mediante las principales técnicas de aporte [1].	5
Figura 5. Piezas fabricadas por WAAM y posteriormente mecanizada (Norsk Titanium [4]) (arriba) y piezas fabricadas en TEKNIKER mediante LMD (abajo) donde se aprecia una notable mejora en la calidad (menor necesidad de operaciones de mecanizado posteriores).	6
Figura 6. Ciclo Hype para la impresión 3D realizado por la empresa Gartner [6].	8
Figura 7. Pieza fabricada sin control y mediante el sistema de control CLAMIR [9].	9
Figura 8. Sistemas de control de lazo cerrado incorporados por productores de máquinas de fabricación aditiva [1].	10
Figura 9. Proceso LMD con aporte de hilo metálico. a) Aporte de la primera capa formada por la fusión de cordones de soldadura solapados; b) estado de la pieza en el aporte de la capa número 70 tras superponer las anteriores capas una encima de la anterior.	18
Figura 10. Piezas fabricadas por diferentes tecnologías de FA metálica. Pieza fabricada por Addilan mediante la tecnología WAAM [17], LMD por Tekniker y SLM por Trumpf [24].	20
Figura 11. Esquema de la configuración de los cabezales de aporte de LMD-P y LMD-W. a) Cabezal de LMD-P; b) cabezal de LMD-W.	21
Figura 12. Variables de entrada, proceso y salida en el proceso LMD [13].	22
Figura 13. Parámetros dimensionales de un cordón aportado por LMD [13].	22
Figura 14. Diferentes configuraciones de los cabezales de aporte LMD-P de la empresa Precitec [29]. a) Aporte continuo; b) aporte lateral; c) aporte discreto.	24
Figura 15. Configuraciones de aporte de hilo metálico en el proceso LMD-W. a) Hilo lateral [33]; b) hilo coaxial y láser discreto [35]; c) hilo coaxial y laser continuo en forma de corona circular [36].	25
Figura 16. Evolución de la forma y tamaño del spot láser respecto de la distancia focal para tres colimadores diferentes [52].	28
Figura 17. Caracterización de láser empleado en el proceso LMD. a) Distribución de potencia láser en el foco; b) imagen 3D del foco; c) evolución de la forma del láser a diferentes alturas con el criterio del 86% de la energía; d) radio del spot láser en función de la distancia de trabajo respecto de una referencia fija en el cabezal.	29
Figura 18. Esquema de la disposición de láser, boquilla de aporte e hilo en cabezal de aporte de hilo coaxial. a) Disposición normal sin interferencias; b) interferencia entre láser y boquilla por un ángulo del láser excesivamente estrecho; c) aumento de la distancia entre boquilla y superficie de aporte para evitar la colisión entre boquilla y láser.	30
Figura 19. Piezas con diferentes grados de complejidad y trayectorias de aporte adecuadas para su fabricación. a) Pieza fabricable mediante trayectorias en 3 ejes; b) pieza con paredes inclinadas en	

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

la que son necesarias trayectorias en 5 ejes; c) pieza con diferentes direcciones de crecimiento en la que son necesarios ejes de giro adicionales.....	32
Figura 20. Sistema de FA desarrollado en el proyecto KRAKEN dentro del programa H2020 de la Unión Europea [61]......	33
Figura 21. Trayectorias de aporte generadas para el proceso LMD [81]. a) Trayectoria de 3 ejes consistente en patrón de relleno tipo zig-zag y perímetro externo; b) sistemas de coordenadas de los puntos del perímetro indicando la orientación del cabezal en cada punto en función de la inclinación de la pared.	35
Figura 22. Clasificación del tipo de medida en función del momento de captura y de su empleo en el proceso monitorizado. Esquema generado a partir de [82].	36
Figura 23. Imagen coaxial del baño fundido y determinación del ancho del baño, directamente relacionado con su temperatura.	42
Figura 24. Configuración del cabezal de aporte empleado en [87] mostrando la monitorización por medio de una cámara CCD colocada en el puerto óptico del cabezal.	43
Figura 25. Monitorización del baño de forma coaxial y procesado de imagen para obtener el ancho del cordón [89].	44
Figura 26. Espectro de luz y denominación de rangos dentro del rango infrarrojo [117].	45
Figura 27. Comparativa de los niveles digitales en la monitorización del baño fundido de forma coaxial entre una cámara CMOS en el rango visible y un sensor PbSe no refrigerado operando en el rango MWIR. Se comprueba el mayor rango dinámico de la cámara MWIR al mismo tiempo que una resolución limitada [93].	46
Figura 28. Monitorización del baño off-axis con cámara IR en el rango LWIR. a) Imagen térmica obtenida por la cámara; b) perfil de temperaturas mostrando un adecuado rango dinámico en la distribución de temperaturas del baño.	48
Figura 29. Control de altura basado en un sistema de monitorización con tres cámaras off-axis alrededor del cabezal del aporte [106].	51
Figura 30. Monitorización de altura de la pieza con proyección de línea láser y cámara CCD off-axis [108].	52
Figura 31. Monitorización de la altura del cordón aportado mediante proyección de línea láser por delante y por detrás del baño fundido y control del ancho del baño con cámara coaxial [91].	53
Figura 32. Monitorización de la altura del cordón por delante del baño fundido mediante proyección láser y cámara off-axis y control del ancho de baño con cámara coaxial [92].	54
Figura 33. Control de altura entre aporte de capas basado en el escaneo de la superficie por escáner de triangulación láser comercial [8].	55
Figura 34. Medida de la altura de la pieza mediante triangulación láser a través del camino óptico del láser [109].	56
Figura 35. Modos de transferencia de material descritos en [112] en función de la distancia entre boquilla y substrato. De izquierda a derecha: modo de transferencia óptimo, modo de transferencia de roce, donde existe riesgo de enganche del hilo, y modo de transferencia débil, con posibilidad de goteo del material fundido.	58
Figura 36. Sistema de medida alrededor del láser de proceso basado en interferometría láser desarrollado por Fraunhofer ILT [114].	59

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Figura 37. Control de lazo cerrado empleado por el sistema de monitorización y control CLAMIR desarrollado por la empresa Near Infrared Technologies [124] y el centro tecnológico AIMEN [9].	61
Figura 38. Software de monitorización y control del proceso LMD Thermaviz de la empresa Stratonics [125].	62
Figura 39. Sensor de medida OCT de la empresa Precitec. a) Sistema OCT integrado en cabezal láser; b) principio de medida OCT y camino óptico del cabezal.	63
Figura 40. Demostración de la aplicación de un control de altura basado en el sistema de medida OCT desarrollado por la empresa Precitec [126]. Izquierda: pieza fabricada sin control; derecha: pieza fabricada con control.	63
Figura 41. Máquina de LMD-P OPTOMECH LENS CS800 [53].	64
Figura 42. Máquina de LMD-P DMD 505D de la empresa DM3D Technology [54].	64
Figura 43. Máquina híbrida de LMD-P con mecanizado Lasertec 65 de la empresa DMG Mori [58].	65
Figura 44. Máquina LMD-P MAGIC 800 de la empresa BeAM [55].	65
Figura 45. Demostrador de la aplicación del control de altura basado en la medida por medio del sensor OCT de Precitec [129]. Izquierda: pieza fabricada sin control; derecha: pieza fabricada con control de altura.	66
Figura 46. Metodología y plan de ensayos de los capítulos principales del trabajo.	70
Figura 47. Celda de fabricación LMD-P. a) Fotografía general de la celda; b) cabezal de aporte equipado con la cámara de atmosfera inerte en la que se introduce un flujo continuo de argón para crear una atmosfera libre de oxígeno.	71
Figura 48. Evolución del contenido de oxígeno dentro de cámara de atmosfera inerte. Inicialmente se introduce un flujo de argón durante 20 minutos y posteriormente se detiene.	72
Figura 49. Boquilla de aporte desarrollada en TEKNIKER.	73
Figura 50. Sistema de fabricación LMD-W. a) Descripción de los elementos de la celda; b) cámara de atmosfera inerte.	73
Figura 51. Escáner de luz estructurada HP SLS3.	75
Figura 52. Configuración del escáner de medida basado en luz estructurada Photoneo Phoxi 3D en la celda de aditivo LMD-W.	76
Figura 53. Sistema de monitorización fijado en el cabezal de aporte, con escáner de luz estructurada GOCATOR 3109, cámara de visión e iluminación láser.	77
Figura 54. Configuración del sistema de monitorización y control dentro de la cámara de atmosfera controlada.	78
Figura 55. Elementos de los cabezales de aporte de las celdas LMD. a) Cabezal de LMD-P; b) cabezal de LMD-W.	78
Figura 56. Imagen del baño fundido obtenido mediante cámara coaxial para el proceso LMD-W para diferentes direcciones de movimiento.	79
Figura 57. Representación de la intensidad de luz capturada en el proceso LMD-W por el sistema de iluminación lateral. Columna izquierda: espectro de adquisición de cámara filtrada y sin filtrar; columna derecha: radiación capturada en proceso con cámara filtrada y sin filtrar.	80

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Figura 58. Captura de la imagen del proceso LMD-W mediante diferentes configuraciones de cámara e iluminación en sistema de monitorización lateral. a) Cámara CMOS; b) cámara CMOS con iluminación LED; c) cámara de alta velocidad.....	81
Figura 59. Imagen de la interacción entre el hilo metálico y el baño fundido, obtenido mediante sistema de monitorización compuesto por cámara lateral e iluminación láser para diferentes direcciones de movimiento.....	81
Figura 60. Formación de una bola en proceso capturada con el sistema de monitorización lateral.	82
Figura 61. Esquema de protocolos de comunicación empleados en proceso	83
Figura 62. Generación de trayectorias a partir de pieza en formato .STL [81]. a) Detección de puntos dentro de la geometría; b) trayectoria zig-zag de relleno; c) trayectoria de contorno.	85
Figura 63. Puntos que componen la trayectoria de aporte del contorno de la geometría con reorientación del cabezal. a) Representación de los sistemas de coordenadas de los puntos del contorno que definen la posición y orientación del cabezal de aporte; b) vista detallada de los puntos del contorno.....	85
Figura 64. Esquema del crecimiento de la pieza tras el aporte de una capa con la terminología empleada para definir los parámetros de crecimiento.	88
Figura 65. Hexaedro fabricado por LMD-P con una altura de capa teórica de 0,3 mm.	89
Figura 66. Altura de capa real para cada grupo de capas aportado y evolución del error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para el proceso LMD-P. a) Altura de capa real determinada por el escáner; b) error de altura.....	91
Figura 67. Porcentaje de atrapamiento de polvo y tasa de aporte de material en función de la altura de capa teórica. La línea roja horizontal representa la eficiencia en el caso de la aplicación del control de altura.	92
Figura 68. Diferentes situaciones de distancia entre boquilla de aporte y pieza, mostrando el efecto sobre la estabilidad del proceso y la eficiencia de atrapamiento de material.	93
Figura 69. Aporte de cordones individuales. a) Defecto de goteo de material; b) aportes con condiciones adecuadas; c) aportes con rozamiento y enganche de hilo.	94
Figura 70. Cabezal de aporte desarrollado por Fraunhofer IWS. a) Boquilla de aporte de hilo con representación de los tres haces divididos y su enfoque en el hilo metálico; b) esquema del sistema óptico interior del cabezal. El prisma divide el haz láser principal en tres haces que vuelven a ser enfocados en un mismo punto gracias a tres espejos colocados alrededor.....	95
Figura 71. Caracterización del láser de proceso realizada con el equipo PRIMES FocusMonitor tras su paso por el cabezal de aporte de hilo coaxial desarrollado por Franhofer IWS.	96
Figura 72. Hexaedros fabricados por LMD-W con diferentes alturas de capa teóricas. a) 0,85 mm de altura de capa teórica sin control; b) 0,93 mm de altura de capa teórica sin control; c) 0,9 mm de altura de capa teórica sin control; d) caso con la aplicación del control de altura.	97
Figura 73. Altura de capa real para cada grupo de capas aportado y evolución del error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para el proceso LMD-W. a) Altura de capa real determinada por el escáner; b) error de altura.	98
Figura 74. Comparativa de la altura de capa real y error de altura de capa en función de la altura de pieza real para los procesos LMD-P y LMD-W. a) Altura de capa real; b) error de altura.....	100
Figura 75. Esquema con trayectoria robótica y diferentes denominaciones utilizadas en función de las transformaciones realizadas hasta el movimiento real.....	105

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Figura 76. Ejemplo de trayectoria con diferentes precisiones para los puntos programados [132].	106
Figura 77. Posición y velocidad del robot en una trayectoria tipo esquina para diferentes precisiones de alcance del punto de la esquina (rojo). De mayor a menor precisión: fine, r0.3, r1, r3. a) Posición del robot en el plano horizontal; b) velocidad de avance del robot.	107
Figura 78. Resultado de precisión de alcance del punto en piezas fabricadas por LMD-W. a) Punto de paso con error de 0,3 mm; b) punto de paro.	107
Figura 79. Registro de posición y velocidad en trayectoria de aporte con relleno tipo zig-zag y perímetro externo. a) Registro de posición de trayectoria de aporte de dos capas consecutivas; b) vista alzada de las trayectorias; c) registro de la velocidad en las trayectorias.	108
Figura 80. Trayectoria de relleno de pieza y cálculo del valor de solape en el interior de la pieza.	109
Figura 81. Pieza fabricada por LMD-W con patrón de relleno tipo zig-zag alternando la dirección y un perímetro externo. a) Pieza fabricada mediante LMD-W; b) CT de la pieza mostrando defectos en el relleno transversal; c) CT de la pieza mostrando defectos en el relleno longitudinal.	110
Figura 82. Esferas patrón con diferentes acabados superficiales. a) Acabado especular; b) acabado semi-especular; c) acabado mate.	114
Figura 83. Comparativa de escaneos realizados sobre bolas patrón con acabado semi-especular y mate.	115
Figura 84. Proceso de referenciación de la nube de puntos para determinar la dirección de crecimiento de la pieza. a) Nube de puntos de la base del aporte referenciada al sistema de coordenadas del escáner (SCS); b) nube de puntos de la base del aporte referenciada al sistema de coordenadas usuario (UCS).	118
Figura 85. Nube de puntos adquirida en la fabricación de una pieza, referenciada al sistema de coordenadas UCS. La dirección de crecimiento de la pieza coincide con el eje Z (amarillo) del UCS.	118
Figura 86. Obtención de los puntos de la base y de la superficie superior de la pieza para la determinación del sistema de coordenadas UCS y obtención de la altura de la pieza.	119
Figura 87. Determinación de la altura de la pieza: a) Nube de puntos de la parte superior de la pieza; b) histograma con la altura de los puntos indicando la media y la moda de las alturas.	120
Figura 88. Sistemas de coordenadas empleados en la calibración del sistema de medida y proceso de palpado del plato de calibración con el cabezal de aporte.	122
Figura 89. a) Representación de los sistemas de coordenadas involucrados en la calibración hand-eye mediante el método Tsai-Lenz; b) ajuste de esferas a la nube de puntos del escaneo del patrón de calibración.	124
Figura 90. Validación del resultado de la calibración hand-eye, mostrando los sistemas de coordenadas en las diferentes posiciones del robot. Tras aplicar el resultado de la calibración el sistema de coordenadas del objeto, OCS, coincide para las todas las poses de escaneado.	127
Figura 91. Digitalización de geometría mediante escáner basado en luz estructurada. a) Pieza cilíndrica fabricada mediante LMD con aporte de hilo de titanio Ti6Al4V; b) escaneo de pieza cilíndrica desde una de las posiciones del robot.	128
Figura 92. Comparativa contra CAD de la pieza escaneada frente al modelo CAD de la pieza, mostrando las desviaciones geométricas.	129

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Figura 93. Nube de puntos obtenida tras juntar los escaneos desde diferentes posiciones, indicando la altura obtenida en la pieza con dos escalas de color diferentes. Arriba, altura total de la pieza desde la base de la fabricación; abajo, desviación de altura respecto de la altura media de la superficie superior de la pieza.....	130
Figura 94. Digitalizado de superficie superior de pieza. a) Pieza de titanio cilíndrica fabricada en atmosfera libre de oxígeno; b) nube de puntos de la superficie superior de la pieza.....	131
Figura 95. Cilindro de titanio fabricado por LMD-W junto con sus dimensiones.	132
Figura 96. Digitalizado de pieza de mediano tamaño. a) Pieza tras el aporte de las primeras capas; b) escaneo individual de una parte de la pieza.	132
Figura 97. Nubes de puntos resultantes de los escaneos de varios grupos de capas en diferentes etapas de la fabricación.	133
Figura 98. Alabe de acero inoxidable fabricado mediante LMD-P. a) Geometría final tras su fabricación; b) digitalizado de la geometría mediante alineamiento manual y cosido de diferentes escaneos.	133
Figura 99. Apoyo al mecanizado posterior de la pieza mediante el digitalizado de la geometría. a) Alineamiento del escaneo de la pieza a la geometría teórica; b) demostrador de pieza parcialmente mecanizada.	134
Figura 100. Procedimiento llevado a cabo en la experimentación	141
Figura 101. Lazo cerrado de control para el ajuste de la altura de capa real en base a la eliminación o a la adición de capas.....	143
Figura 102. Ejemplo de aplicación del control.....	144
Figura 103. Trayectorias de aporte. En azul se muestran los movimientos sin aporte y en rojo los de aporte. a) Trayectorias de aporte de la pieza completa; b) trayectorias de aporte una sola capa...	146
Figura 104. Pieza fabricada sin control con 0,3 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.	147
Figura 105. Pieza fabricada con control con 0,3 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.	147
Figura 106. Error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para una altura de capa teórica de 0,3 mm. Casos con control (rojo) y sin control (azul) de altura.....	148
Figura 107. Pieza fabricada sin control con 1 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.	149
Figura 108. Pieza fabricada con control con 0,3 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.	149
Figura 109. Error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para una altura de capa teórica de 1 mm. Casos con control (rojo) y sin control (azul) de altura.....	150
Figura 110. Pieza fabricada sin control con 0,7 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.	150
Figura 111. Pieza fabricada con control con 0,7 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.	151
Figura 112. Error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para una altura de capa teórica de 0,7 mm. Casos con control (rojo) y sin control (azul) de altura.....	152

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Figura 113. Estrategias de control de altura. a) Control de altura basado en la modificación de las capas a aportar previamente calculadas (apartado 7.2); b) control de altura basado en la generación de trayectorias adaptativas (apartados 7.3 y 7.4)..... 154

Figura 114. Estrategia de control de altura mediante cálculo de trayectorias adaptativas..... 155

Figura 115. Seccionamiento del CAD basado en el escaneado de la pieza..... 156

Figura 116. Seccionamiento del CAD y cálculo de las trayectorias de aporte. A) CAD de la pieza completa en formato STL; b) detalle del CAD de la pieza mostrando la sección verde a aportar; c) trayectorias de aporte calculadas en el interior de la sección a aportar. 157

Figura 117. Pieza de demostración de la aplicación del control de altura en el proceso LMD-P.. 159

Figura 118. Pieza de demostración de la estrategia de control de altura para el proceso LMD-P. a) Modelo CAD de la pieza; b) desviaciones de la geometría fabricada respecto del CAD de partida. 160

Figura 119. Comparativa contra CAD de pieza fabricada por LMD-P. Como consecuencia de las diferencias en su sección y los efectos térmicos, el crecimiento de la pieza es mayor en las zonas en las que se acumula más material. 162

Figura 120. Estrategia de corrección de la altura media de la capa y desviaciones locales intra-capas. a) Desviaciones de la pieza respecto de la altura media de la capa; b) corrección de la altura media realizando el corte sobre el CAD, en formato STL, empezando desde la altura media de la capa. 164

Figura 121. Control local de altura intra-capas basado en escaneo del perfil de altura de la pieza. a) Nube de puntos escaneada en la pieza y trayectorias de aporte; b) discretización de la trayectoria. Izq.: Puntos consecutivos antes de discretización. Dcha.: Puntos consecutivos tras discretización; c) control de altura intra-capas..... 164

Figura 122. Diagrama del control de altura local basado en la variación de la velocidad de movimiento del robot. 167

Figura 123. Trayectorias de aporte con diferentes parámetros de entrada en el control de altura intra-capas d y r . a) $d=0,5$ mm, $r=0,5$ mm; b) $d=3$ mm, $r=1$ mm; c) $d=1$ mm, $r=2$ mm..... 168

Figura 124. Geometrías con diferencias de altura fabricadas de forma deliberada para la demostración del control de altura basado en la variación local de la tasa de aporte..... 169

Figura 125. Trayectoria de aporte de cilindro mediante movimientos circulares concéntricos; movimientos de aporte (azul) junto con movimientos sin aporte de material (rojo). 170

Figura 126. Corte de los hexaedros fabricados con diferentes velocidades de movimiento del robot. a) Hexaedro completo fabricado con la velocidad nominal de 20 mm/s; b) incremento de velocidad del 20%, 24 mm/s; c) incremento de velocidad del 10%, 22 mm/s; d) velocidad nominal, 20 mm/s; b) reducción de velocidad del 10%, 18 mm/s; b) reducción de velocidad del 20%, 16 mm/s. 172

Figura 127. Corrección de defecto escalón con la estrategia de control de altura. a) Defecto escalón provocado; b) pieza tras la aplicación de la corrección; c) perfil de altura para cada capa aportada; d) evolución de la altura de la pieza a ambos lados del defecto. 173

Figura 128. Corrección de defecto cajera con la estrategia de control de altura. a) Defecto cajera provocado; b) pieza tras la aplicación de la corrección; c) perfil de altura para cada capa aportada; d) evolución de la altura de la pieza en el centro de la cajera y a un lado de la pieza, fuera de la cajera. 174

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Figura 129. Cortes de las piezas mostrando una vista detallada de la corrección de los defectos provocados y el solapamiento entre cordones. a) Corrección del defecto escalón; b) corrección del defecto cajera. 175

Figura 130. Pieza cilíndrica fabricada mediante LMD con aporte de hilo de titanio Ti6Al4V en atmosfera controlada de argón. 176

Figura 131. Escaneo de la capa superior en una etapa intermedia de la fabricación del cilindro fabricado dentro de la cámara de atmosfera inerte. 176

Figura 132. Velocidad de avance del robot introducido en cada movimiento de aporte resultado de la aplicación del control de altura presentado en el apartado 7.4. 177

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Índice de tablas

Tabla 1. Precio de materiales en forma de polvo e hilo en una comparativa realizada por Sciaky [49] y posteriormente resumida en [47].	27
Tabla 2. Resumen de los trabajos científicos sobre la monitorización y control del proceso LMD.	40
Tabla 3. Técnicas alternativas candidatas para ser empleadas en el futuro para la medición de la geometría de la pieza generada por FA [120].	58
Tabla 4. Parámetros relacionados con la monitorización y control de la altura de la pieza y variables empleadas a lo largo del trabajo para su denominación.	88
Tabla 5. Parámetros del proceso LMD-P empleados para el estudio de la influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso.	89
Tabla 6. Resultado de las piezas fabricadas con diferentes alturas de capa teóricas y el caso de la aplicación del control de altura para el proceso LMD-P.	93
Tabla 7. Parámetros del proceso LMD-W empleados para el estudio de la influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso.	96
Tabla 8. Resultado de las piezas fabricadas con diferentes alturas de capa teóricas y el caso de la aplicación del control de altura para el proceso LMD-W.	99
Tabla 9. Valores aproximados del error de altura permisible para los procesos LMD-P y LMD-W.	101
Tabla 10. Capacidades de las metodologías de control de altura desarrolladas.	140
Tabla 11. Parámetros del proceso LMD-P empleados para el control de altura basado en la selección de capas a aportar.	145
Tabla 12. Casos de piezas fabricadas con diferentes alturas de capa teóricas y con la aplicación o no aplicación del control de altura desarrollado en este apartado.	145
Tabla 13. Parámetros del proceso LMD-P empleados para el control de altura basado en la modificación adaptativa de las trayectorias de aporte.	158
Tabla 14. Parámetros de proceso LMD-W empleados para el demostrador del control de altura en el caso 1.	171
Tabla 15. Parámetros de proceso LMD-W empleados para el demostrador del control de altura en el caso 2.	171
Tabla 16. Artículos de investigación publicados con los resultados de la tesis.	182
Tabla 17. Otros artículos de investigación publicados por la línea de fabricación aditiva de Tekniker.	183

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Lista de acrónimos

- ASTM: American Society of Testing Materials
- CAD: Computer Aided Design
- CAM: Computer Aided Manufacturing
- CCD: Charge Coupled Device
- CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor
- CNC: Control Numérico por Computadora
- CT: Computed Tomography
- DED: Directed Energy Deposition
- DIN: Deutsches Institut für Normung
- EBAM: Electron Beam Additive Manufacturing
- EBM: Electron Beam Melting
- FA: Fabricación Aditiva
- FAA: Federal Aviation Administration
- FDM: Fused Deposition Modeling
- FPGA: Field Programmable Gate Array
- FTP: File Transfer Protocol
- IR: Infrared Radiation
- ISO: International Organization for Standardization
- LMD: Laser Metal Deposition
- LMD-P: Powder Laser Metal Deposition
- LMD-W: Wire Laser Metal Deposition
- LWIR: Long Wavelength Infrared Radiation
- OCS: Object Coordinate System
- PC: Personal Computer
- PCA: Principal Component Analysis
- PID: Proporcional, Integral y Derivativo
- MCS: Machine Coordinate System

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

MWIR: Mid Wavelength Infrared Radiation

NDT: Non Destructive Testing

NIR: Near Infrared Radiation

PBF: Powder Bed Fusion

SCS: Scanner Coordinate System

SLM: Selective Laser Melting

STL: Standard Triangle Language

SWIR: Short Wavelength Infrared Radiation

TCP: Tool Center Point

TCS: TCP Coordinate System

UCS: User Coordinate System

WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Capítulo 1. Introducción

1.1. Aspectos generales de la fabricación aditiva metálica

La fabricación aditiva (FA) es una de las técnicas de fabricación que más ha crecido en los últimos años y con mayor previsión de crecimiento en el futuro. En un informe realizado por la consultora AMPOWER [1] se prevé una tasa de crecimiento anual del 27,9 % en los próximos años, los que supone un incremento del volumen de mercado de los fabricantes de equipos de FA metálica de 2,02 billones de euros en 2019 a 6,92 billones de euros en 2024 (Figura 1).

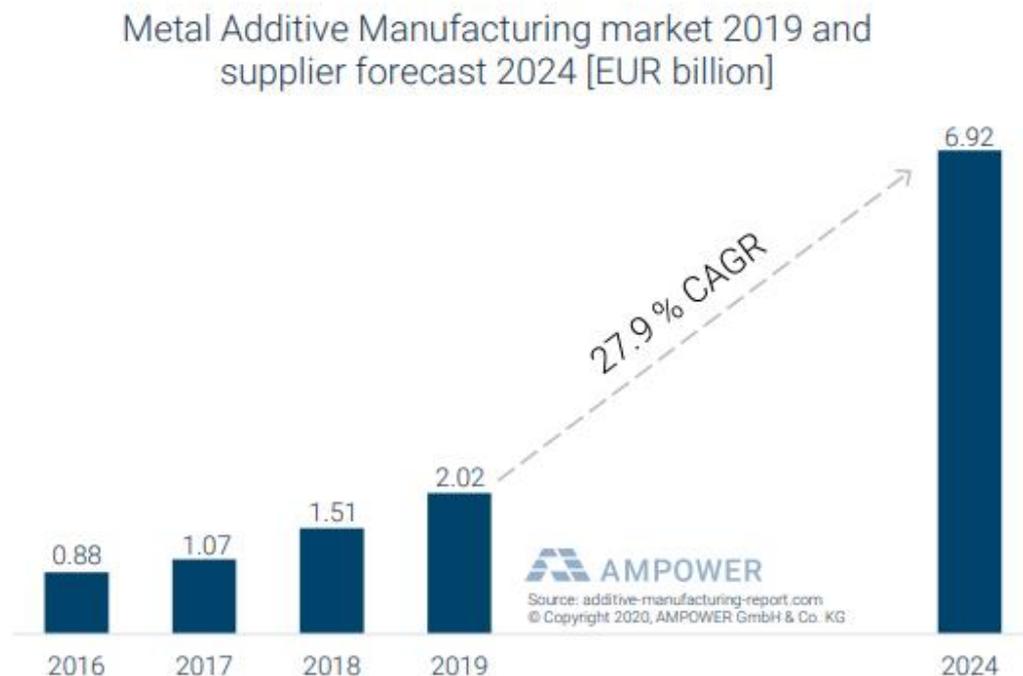


Figura 1. Volumen de mercado de los fabricantes de equipos de fabricación aditiva metálica y previsión de crecimiento en los próximos años [1].

La razón del interés que despierta es que la fabricación aditiva tiene unas características únicas que la hacen diferente a los demás métodos de fabricación. En la fabricación convencional de piezas metálicas, se parte de un bloque del material base sobre el que se mecaniza hasta conseguir la forma de la pieza deseada. En piezas con grandes huecos interiores o nervios, como las piezas estructurales del fuselaje de un avión, la eliminación del material sobrante supone uno de los mayores costes del proceso.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En la fabricación aditiva, por otro lado, las piezas son construidas capa a capa a partir de un modelo tridimensional generado por ordenador. Existen diferentes variantes del proceso dependiendo del tipo de fuente de energía utilizado (láser, haz de electrones, arco eléctrico) y de la forma en que se realiza el aporte de material (Figura 2). Las técnicas Selective Laser Melting (SLM) y Electron Beam Melting (EBM), que emplean como fuente de energía un láser y un haz de electrones respectivamente, cuentan con una cama de polvo metálico pre-depositado en el que se funden de forma selectiva las zonas de la capa donde se pretende generar la geometría sólida. Una vez terminada la capa, la cama desciende y se introduce una nueva capa de polvo. Estas tecnologías, que se engloban dentro del grupo denominado Powder Bed Fusion (PBF), han permitido desarrollar equipos compactos que generan piezas con propiedades mecánicas superiores a las piezas de fundición, y en ocasiones similares a la forja, como los sistemas desarrollados por ARCAM (EBM), EOS (SLM) o Concept Laser (SLM). Sin embargo, por el tamaño de la cama de polvo integrada en las máquinas y por las deficiencias que se producen en las piezas, como poros o grietas, al aumentar las tasas de aporte, está limitada a piezas de pequeño o mediano tamaño (máximo 400 mm).

Por otro lado, la técnica Laser Metal Deposition (LMD) consiste en un haz láser que funde el material aportado directamente en la zona de fusión en forma de polvo o hilo metálico. Por este motivo, esta técnica se engloba dentro del grupo denominado Directed Energy Deposition (DED). Las tasas de aporte alcanzables son mayores que en las técnicas de cama de polvo, estando limitadas por la potencia del láser disponible. Es por esto, que parece el proceso adecuado para la fabricación de piezas de gran tamaño.

ASTM classification	Term used in this article	Commercial name	Machine manufacturer		
Powder bed fusion (PBF)	Laser-PBF	Direct metal laser sintering (DMLS)	EOS		
		LaserCUSING	Concept Laser		
		Selective laser melting (SLM)	Matsuura		
		Direct metal production (DMP)	Phenix (3D systems)		
		Selective laser melting (SLM)	Renishaw		
		Selective laser melting (SLM)	Realizer		
		Laser metal fusion (LMF)	Sisma Group		
		Selective laser melting (SLM)	SLM Solutions		
		Electron beam melting (EBM)	ARCAM		
		Directed energy deposition (DED)	Electron beam-PBF		
			Powder-DED	Direct metal deposition (DMD)	POM
				Laser engineer net shaping (LENS)	Optomec
			Laser consolidation	Accufusion	
		Laser deposition	Irepa Laser		
		Laser deposition	Trumpf		
		Laser deposition	Huffman		
	Wire-DED	Electron beam direct melting (EBDM)	Sciaky		
		Shape metal deposition (SMD)	Other		

Figura 2. Tecnologías de fabricación aditiva metálica y principales fabricantes [2].

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Aunque la pieza construida requiera de un acabado posterior, la geometría generada es cercana a la pieza final (near net shape), por lo que se ahorra material y se reduce el tiempo de mecanizado y el desgaste de las herramientas de corte, especialmente en operaciones de grandes vaciados.

Esta característica hace que este proceso sea atractivo cuando se trata de procesar materiales caros o difíciles de mecanizar, como lo son algunas de las aleaciones metálicas empleadas en la industria aeronáutica o aeroespacial. Otras veces, la propia geometría de la pieza propicia que el proceso de fabricación aditiva sea idóneo, como piezas con zonas poco accesibles o con canales interiores.

1.2. Los procesos de fabricación aditiva metálica en la industria aeronáutica y aeroespacial

La industria aeronáutica es probablemente con la aeroespacial la que más fácilmente puede justificar la utilización de la impresión 3D. Debido al alto coste de producción por unidad de peso de componente fabricado que implica la utilización de la FA, únicamente los sectores que fabrican bienes con los mayores valores añadidos del mercado justifican la adopción de estas nuevas tecnologías productivas en sus procesos de fabricación.

Las razones por las que este sector está tan interesado en esta tecnología se describen a continuación:

- Los materiales empleados para estos sectores son caros, por lo que la reducción del material eliminado supone un ahorro económico importante. El termino buy-to-fly ratio hace referencia a la relación entre la cantidad de material base antes de la fabricación y la cantidad de material en la pieza final. Con los métodos de fabricación convencional este ratio puede alcanzar valores de 10:1 mientras que con la fabricación aditiva es cercano a 1:1.
- La fabricación aditiva abre una puerta a la fabricación de piezas optimizadas, que a su vez requieren de nuevas estrategias de diseño. En la Figura 3 puede verse un cinturón de seguridad de un avión en el que se ha optimizado el diseño para la reducción de peso. Algunas de estas piezas, pueden ser difíciles o imposibles de fabricar con métodos convencionales de fabricación.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA



Figura 3. Optimización topológica de cinturón de seguridad de avión fabricado por EOS.

En diciembre de 2016 Airbus llegaba a un acuerdo con la compañía de fabricación avanzada Arconic, para incorporar elementos de titanio en el fuselaje y aleaciones de níquel en piezas del motor en el A320. Al mismo tiempo, se adquiriría un equipo de fabricación aditiva por haz de electrones o Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) del fabricante Sciaky.

Por otro lado, la compañía General Electric Aviation anunció en septiembre de 2020 la certificación por parte de la Federal Aviation Administration (FAA) del motor GE9X, el cual contiene más de 300 piezas fabricadas mediante FA.

Además de Airbus y General Electric, otros fabricantes del sector, como Boeing o Bombardier, están ampliando sus esfuerzos en I+D+i en la fabricación aditiva. Así, se está realizando especial hincapié en los metales y en los componentes que presentan dificultades de producción (por complejidad geométrica, difícil maquinabilidad u otras razones).

La fabricación de piezas metálicas ha experimentado un auge notorio desde el año 2007. Las tecnologías de Selective Laser Melting (SLM) y Electron Beam Melting (EBM) han permitido desarrollar máquinas compactas y tecnológicamente muy avanzadas de modo que las técnicas PBF supusieron el 85% de las ventas respecto de las ventas totales de equipos de FA metálica en el año 2019, como se muestra en la Figura 4 obtenida del informe realizado por la consultora AMPOWER [1]. Sin embargo, el mismo informe prevé un aumento de las tecnologías DED del 8,3% en el año 2019 al 11,1% en un plazo de cinco años.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

System sales revenue by technology 2019

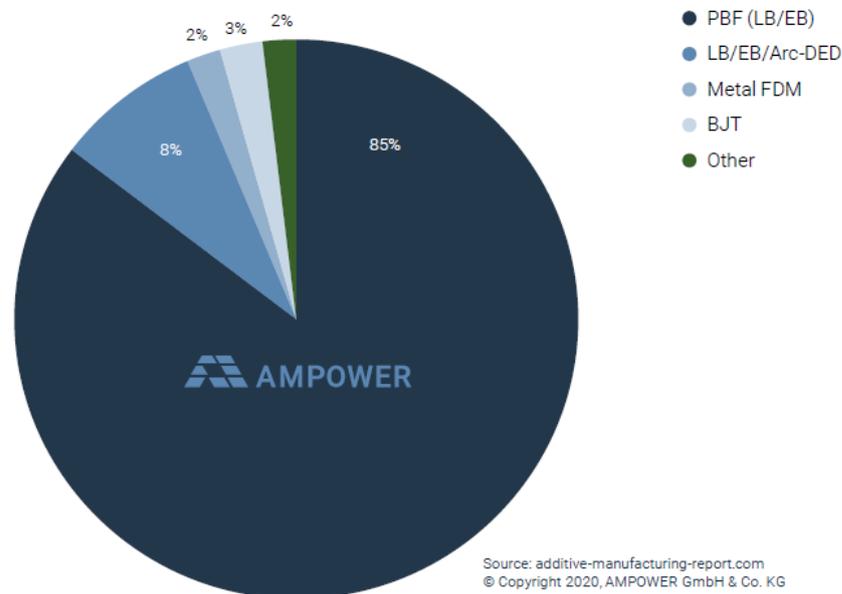


Figura 4. Porcentaje de ventas de equipos de FA metálica clasificado mediante las principales técnicas de aporte [1].

Una de las alternativas productivas más viables en la fabricación de piezas de gran tamaño y que permite controlar el proceso de un modo más preciso que sus alternativas [3] es el Laser Metal Deposition (LMD) o Fusión directa por Láser. El control de proceso al utilizar fuentes láser con alimentación coaxial (necesaria para fabricar piezas 3D con una buena flexibilidad geométrica) que se da en el LMD permite alcanzar tasas de aporte de entre 10-30 veces superiores a las logradas en la tecnología SLM alcanzando un límite superior cercano a los 2 kg/h hoy en día. El empleo de láseres de mayor potencia llevará a alcanzar mayores productividades y la implementación de un sistema de control multivariable que englobe el aspecto térmico y geométrico del proceso asegurará que los incrementos de productividad no perjudiquen la calidad estructural del material aportado.

Con respecto a las tecnologías que compiten en el segmento de las grandes piezas metálicas existen otras dos dentro del grupo de técnicas DED, la fabricación aditiva por medio de arco eléctrico o Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) y por haz de electrones (EBAM). La ventaja fundamental del proceso LMD con respecto al WAAM es que el LMD es un proceso mucho más controlable debido a la naturaleza de la fuente láser, y esto permite implementar controles en tiempo real

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

que actúen sobre los parámetros que se están midiendo en el mismo instante en que se aporta material. Debido a esta controlabilidad, la calidad geométrica de las piezas aportadas es mucho mayor en el proceso LMD que en el WAAM, aumentando la eficiencia energética y de material del proceso por un lado y reduciendo los procesos de mecanizado posterior por otro. El factor comparativo asociado a la pieza final ('near net shape') es mucho mejor en el LMD que mediante la tecnología WAAM. Con respecto a la impresión por haz de electrones, la principal ventaja del LMD es que se puede aplicar en atmósfera controlada (Argón, Helio) y no requiriendo de vacío, abaratando muy significativamente el coste del equipamiento a utilizar.

En la Figura 5 se muestran piezas fabricadas con las dos tecnologías más demandadas en la fabricación aditiva de metales de gran tamaño, el WAAM, que actualmente logra las mayores tasas de aporte (en torno a 2-3 veces más productivo que el LMD) y las piezas fabricadas por LMD que presentan un muy buen ratio calidad/tasa de aporte y que en un futuro próximo se prevé que alcanzarán las tasas de aporte logradas hoy en día con el WAAM.

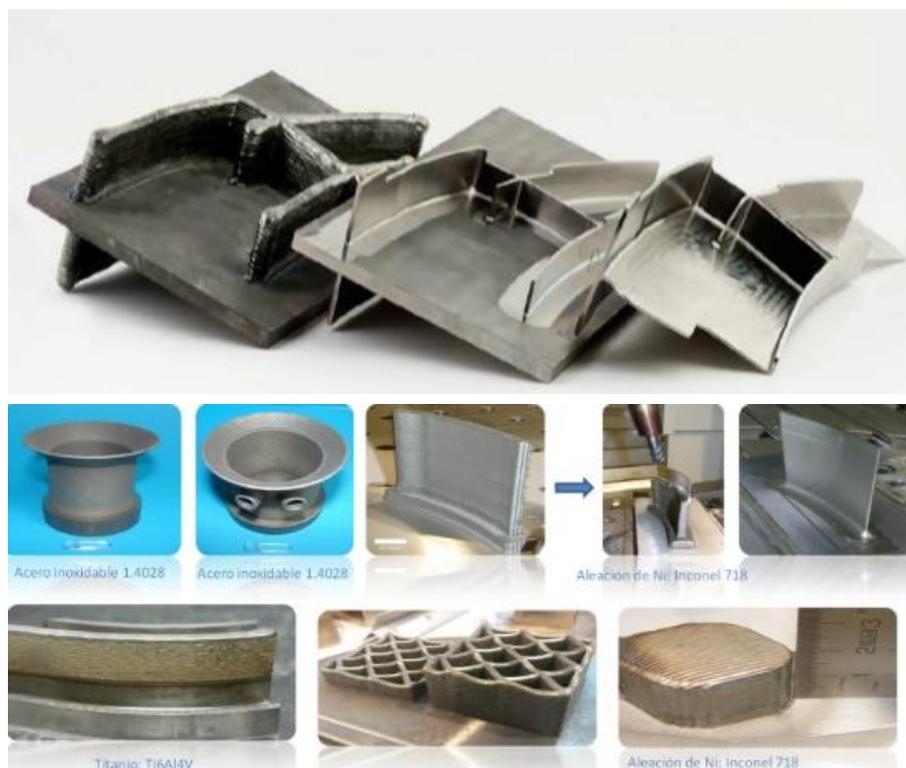


Figura 5. Piezas fabricadas por WAAM y posteriormente mecanizada (Norsk Titanium [4]) (arriba) y piezas fabricadas en TEKNIKER mediante LMD (abajo) donde se aprecia una notable mejora en la calidad (menor necesidad de operaciones de mecanizado posteriores).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

La utilización de la fabricación aditiva se justifica principalmente en sectores y aplicaciones donde se busque una alta personalización, las tecnologías substractivas sean costosas o el ahorro de peso sea fundamental. En este escenario, el sector aeronáutico tiene un gran reto. Según un análisis realizado por Gilani et al. [5], el ahorro en peso de las piezas que vuelan implica ahorros de entre 55,25 y 209,54 \$/kg/año para cada aeronave, en función de su tamaño y de la distancia de la ruta recorrida. Teniendo en cuenta que la vida útil media de una aeronave es de 25 años esto supone un ahorro de entre 1.381,17 y 5.238,58 \$/kg durante toda la vida en servicio. Por otro lado, los materiales que se emplean estructuralmente y en componentes de motor, aleaciones de titanio, níquel y cobalto, son costosos, difíciles de mecanizar y tienen altos grados de desecho de material (ratios buy-to-fly altos) por lo que es más eficiente aportar por procesos aditivos para después mecanizar sobre lo aportado que mecanizar partiendo de una geometría maciza haciendo un vaciado que logre la pieza final.

1.3. Barreras para superar por la fabricación aditiva metálica

La Figura 6 muestra el ciclo de Hype desarrollado por la empresa Gartner para la impresión 3D [6]. La curva de Hype representa las expectativas que una nueva tecnología crea a lo largo del tiempo junto con una predicción del tiempo necesario para que ciertas expectativas lleguen realmente a ser alcanzadas. De esta forma, en toda nueva tecnología existe una primera fase de entusiasmo y expectativas crecientes para la tecnología en cuestión. Los usuarios de la tecnología confían en que abrirá nuevas oportunidades y tiene mucho que ofrecer. Una vez que estas expectativas alcanzan un pico, los consumidores se dan cuenta de que implementar la tecnología será más difícil de lo que se esperaba. Por lo tanto, su entusiasmo por ella comienza a caer en picado. Finalmente, la curva alcanza su segunda ola de crecimiento. A medida que se realizan las inversiones y desarrollos, las expectativas comienzan a subir más gradualmente una vez más hasta llegar a una meseta.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

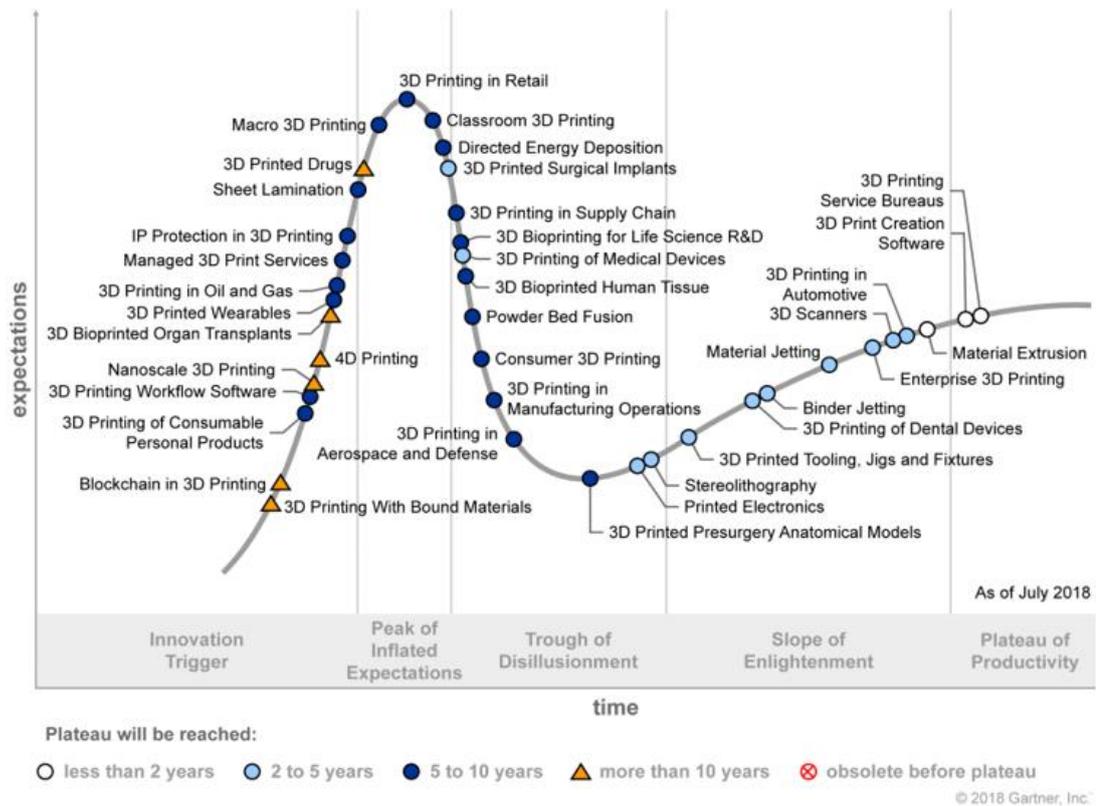


Figura 6. Ciclo Hype para la impresión 3D realizado por la empresa Gartner [6].

Por lo tanto, a pesar de las altas expectativas iniciales de la fabricación aditiva, e igualmente del proceso LMD, es necesario un periodo de desarrollo e inversión en la tecnología para alcanzar su madurez, representada en la meseta de la curva de Hype. Así, existen aún barreras que deben superarse para competir con las técnicas de fabricación convencionales [7].

Una de ellas es el alto coste de los equipamientos. La sustitución de un método convencional por la fabricación aditiva únicamente está justificada en industrias donde el producto tiene un alto valor añadido. Además, los procesos de fabricación actuales cuentan con un conjunto de procedimientos para la fabricación y ensayo de las piezas, que se consideran suficientes para el correcto funcionamiento de la pieza. La fabricación aditiva, sin embargo, no está por el momento suficientemente comprendida como para generar unos estándares de calidad, por lo que el número de distribuidores cualificados es limitado.

La multitud de variantes en el proceso y la gran sensibilidad en el resultado final de la pieza ante pequeños cambios en los parámetros que controlan el proceso, complican aún más esta estandarización. A esto hay que añadirle, que uno de los

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

sectores con mayor interés en el tema, como es el aeronáutico, es precisamente uno de los que más controles de calidad y certificaciones exige.

1.4. Papel de la monitorización y control en el proceso LMD

En este escenario, el desarrollo de un control del proceso LMD es fundamental para asegurar la integridad geométrica y estructural de los componentes fabricados, partiendo del hecho de que es necesario maximizar la tasa de aporte de material. Consecuentemente, aspectos como la monitorización y el control en tiempo real o el desarrollo de algoritmos para el aprendizaje de la máquina [8] toman especial relevancia en un mercado cada vez más competitivo y basado en el concepto Industry 4.0 tan popularizado en estos últimos tiempos.

Como ejemplo, en la Figura 7 puede observarse una pieza fabricada sin control junto con la misma pieza fabricada aplicando el control en lazo cerrado CLAMIR desarrollado por la empresa New Infrared Technologies junto con el centro tecnológico AIMEN [9]. La precisión geométrica y acabado superficial obtenido en el caso de la aplicación del control es notablemente superior, como también es de esperar una mayor integridad de la pieza.



Figura 7. Pieza fabricada sin control y mediante el sistema de control CLAMIR [9].

Debido a la elevada temperatura alcanzada durante el proceso las tecnologías de monitorización más empleadas son las de no contacto con la pieza. Por otro lado, para que una pieza alcance la calidad deseada debe de tenerse en cuenta tanto el aspecto térmico como el geométrico [2].

Los cambios bruscos de temperatura y los continuos ciclos de calentamiento y enfriamiento de la pieza dan lugar a la variación de la microestructura del material, con su correspondiente efecto sobre las propiedades resistentes de la pieza final, lo que hace del control de la temperatura un aspecto crítico. Este control se consigue midiendo la radiación desprendida por la zona de fusión mediante cámaras de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

visión, pirometría o cámaras termográficas [10]. Por otro lado, es importante garantizar la estabilidad geométrica de las piezas. Dado que las piezas se fabrican capa a capa, pueden aparecer alteraciones en la geometría que se propagarían a las siguientes capas, sin olvidar las tensiones residuales producidas por los cambios térmicos que pueden llegar a distorsionar la pieza.

Por esta razón, la monitorización debe estar estrechamente ligada a la metrología, y así se expresa en un informe del National Institute of Standards and Technology estadounidense [11].

Una vez que se determina el aspecto del proceso a monitorizar, puede desarrollarse un control de lazo cerrado que actúe sobre los parámetros de entrada del proceso (potencia, velocidad, tasa de aporte de material), para ajustar el resultado a un valor deseado.

En la Figura 8 puede verse cómo, actualmente, los productores de máquinas de fabricación aditiva incorporan módulos de control de lazo cerrado en sus equipos.

AM process	Machine manufacturer	'Module' name	Failure mode monitored	Parameter altered	Equipment
EB-PBF	Arcam	LayerQam™	Porosity	N/A	Camera
L-PBF	B6 Sigma, Inc. (specialist)	PrintRite3D® INSPECT™	Unknown	N/A	Thermocouple and high-speed camera
	Concept Laser	QM melt pool	Melt pool monitoring	Laser Power	High-speed CMOS-camera
	EOS	N/A	Unknown	N/A	Camera
DED	DEMCON	LCC 100	Melt pool monitoring	Laser Power	Camera
	DM3D Technology	DMD closed-loop feedback system	Melt pool monitoring and build height	Laser Power	Dual-colour pyrometer and three high-speed CCD cameras
	Laser Depth	LD-600	Depth measurement	Laser Power	Inline coherent imaging
	Promotec	PD 2000	Melt pool monitoring	N/A	CMOS-camera
		PM 7000	Melt pool monitoring	N/A	1D photo detector
	Stratonic	ThermaViz system	Melt pool temperature	Laser Power	Two-wavelength imaging pyrometer

Figura 8. Sistemas de control de lazo cerrado incorporados por productores de máquinas de fabricación aditiva [1].

Por otro lado, la monitorización del proceso puede contribuir a una calidad de la pieza mejorada, ya que sólo manteniendo unas condiciones de proceso adecuadas es posible obtener una pieza con la calidad interna requerida. Igualmente, de cara a garantizar la calidad de las piezas y a obtener las certificaciones que exigirían los fabricantes aeronáuticos, al mismo tiempo que se introducen sistemas de monitorización y control del proceso, también es imprescindible llevar a cabo ensayos no destructivos sobre las piezas fabricadas para garantizar la calidad del componente [12].

Actualmente, en la mayoría de los casos las piezas se construyen mediante la metodología de prueba-error. Esto es debido a los múltiples parámetros que afectan al aporte y a la gran sensibilidad del proceso ante pequeños cambios. Por ello, la

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

experiencia del usuario juega un papel fundamental. Esta tesis se plantea como solución para convertir el LMD en una técnica más fiable y fácil de aplicar en entornos industriales. Para ello, se deberán incorporar los sensores necesarios para una celda o máquina de fabricación aditiva y establecer las metodologías de control necesarias para garantizar la adecuada fabricación de los componentes.

1.5. Hipótesis de partida

La aplicación de la fabricación aditiva puede ser una alternativa a los métodos convencionales de fabricación, en ciertas aplicaciones, por los siguientes motivos.

- ✓ Las posibilidades de diseño que se abren permiten optimizar las piezas con menos limitaciones que los métodos de fabricación convencionales, y hacen que la técnica sea interesante en aplicaciones donde la reducción de peso es clave.
- ✓ La naturaleza “near net shape” del proceso supone una ventaja considerable frente a los procesos por arranque de viruta, donde pueden reducirse los costes en materiales caros o difíciles de mecanizar.

El sector más interesado en implementar la fabricación aditiva es el aeronáutico, por el ahorro económico que supone durante la vida de un producto, reducir el peso de sus piezas. La tecnología que mejor se ajusta a la demanda del sector aeronáutico es la LMD, por sus altas tasas de aporte que permite fabricar piezas de gran tamaño y calidad.

Sin embargo, a la vista del estado del arte, es importante introducir técnicas que permitan dar robustez al proceso LMD y llegar a construir piezas fiables para su implementación en la industria. Por otro lado, las correcciones de los parámetros que afectan el resultado final deben hacerse en el momento que se está aportando material, para garantizar la integridad estructural y dimensional de los productos terminados, por lo que la monitorización y control del proceso juega un papel fundamental. Por lo tanto, en este trabajo se plantea el desarrollo de una metodología de medición y corrección geométrica durante el proceso de fabricación LMD.

1.6. Objetivos del trabajo

El principal objetivo de esta tesis es desarrollar una metodología robusta de monitorización y control del proceso de aporte basado en el LMD que permita

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

reducir el tiempo y coste de fabricación y aumente la calidad de las piezas fabricadas.

Así mismo, el proceso de monitorización y control estará compuesto por los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar los métodos existentes en el estado del arte de la monitorización y control en el proceso de aporte. Principalmente centrar la búsqueda a sensores de medida de radiación y de visión. Decidir cuáles son los sensores necesarios y analizar la forma en la que estos sensores se deben incorporar en los equipos.
- Reconocer los parámetros de entrada del proceso que mejor puedan ser controlados, para garantizar los aspectos térmicos y dimensionales deseados. Para ello, se deben llevar a cabo pruebas experimentales cambiando las condiciones y analizar los resultados.
- Desarrollar un sistema de control inteligente que permita ajustar los parámetros de entrada, aumentando la estabilidad y eficiencia del proceso LMD.
- Establecer las comunicaciones entre equipamiento de fabricación y sensores de monitorización y control que permitan aplicar correcciones durante el proceso de manera automática.
- Analizar las distorsiones producidas en la fabricación de piezas comparando el resultado final con el modelo tridimensional realizado en el ordenador. Se deben comparar las piezas fabricadas con los modelos CAD y detectar las diferencias que pueden dar lugar a una pieza no válida.
- Integrar las capacidades de control anteriormente descritas en una única aplicación de cara a progresar en la industrialización del proceso LMD.

1.7. Organización de la memoria

En este primer capítulo de la memoria se ha realizado una introducción a la misma, en la que se explican las razones por las que la FA es un método que ha despertado tanto interés en los últimos años, especialmente en sectores como el aeronáutico o aeroespacial. Por otro lado, se han descrito las barreras que debe superar la FA para ser adoptada como un proceso de fabricación fiable en el entorno industrial y el papel fundamental que juega la monitorización y control del proceso en este aspecto. Posteriormente, se han presentado la motivación y los objetivos de la tesis, para terminar con la descripción de los capítulos de la memoria.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En el segundo capítulo se realiza una revisión del estado del arte de la FA y de los diferentes métodos de monitorización y control existentes en los campos científico e industrial. Inicialmente se presenta el proceso de aporte de material por medio de fuente de energía láser junto con los parámetros fundamentales que gobiernan el proceso y las diferentes variantes que pueden encontrarse en función de la disposición del láser y el aporte de material. Igualmente, se realiza un análisis de los sistemas de movimiento y softwares de generación de trayectorias empleados para fabricar las piezas. A continuación, se realiza una clasificación de los métodos de monitorización y control en función de las características de las medidas realizadas y de la forma en la que se actúa sobre el proceso. Ya enfocado en el proceso de aporte por láser, se presentan los trabajos realizados relacionados con la monitorización y control del proceso tanto desde el punto de vista térmico como geométrico. Por último, se describen los sistemas de monitorización y control que han sido comercializados.

El tercer capítulo contiene el equipamiento empleado para la realización de las pruebas experimentales de este trabajo. La razón por la que se detalla el equipamiento utilizado es que actualmente no existen sistemas convencionales y de uso generalizado, tanto para el proceso LMD como para los equipos de monitorización y control de este proceso. En primer lugar, se describen los sistemas de aporte láser con introducción del material en forma de polvo e hilo metálico. Después, se presenta el equipamiento de monitorización y control empleado, consistente en una variedad de sensores de visión y digitalizado tridimensional. Posteriormente, se presentan los diferentes protocolos de comunicación existentes entre los sistemas de fabricación y los de monitorización y control. Para terminar, se detallan los recursos de software utilizados y desarrollados para la fabricación y control del proceso.

En el cuarto capítulo se trata de comprobar el efecto de una distancia no adecuada entre boquilla de aporte y pieza sobre la estabilidad del proceso LMD. Primero, se establece la terminología empleada a lo largo del documento para nombrar el crecimiento de la pieza y de cada capa individual. Después, se realizan aportes mediante los procesos LMD con aporte de polvo e hilo metálico con diferentes condiciones de proceso para evaluar el resultado de la fabricación ante situaciones de crecimiento de la pieza no óptimas. De esta forma, se trata de entender la importancia de realizar un control de altura sobre la pieza fabricada.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

El quinto capítulo está dedicado a la precisión de movimiento del sistema robótico empleado en la fabricación. Por un lado, se presentan las diferentes fases por las que pasa una trayectoria de aporte, desde la trayectoria teórica, la trayectoria consigna del robot tras aplicarle una modificación por parte del controlador robótico y la trayectoria real realizada por el robot. Por otro lado, se estudia el efecto que estas modificaciones sobre la trayectoria pueden tener sobre la integridad de la pieza y sobre la actuación del control de altura.

En el sexto capítulo se analizan aspectos del digitalizado tridimensional de las piezas fabricadas por LMD. Por un lado, se lleva a cabo un estudio del efecto del acabado superficial de las piezas sobre la calidad y precisión de las nubes de puntos adquiridas. Posteriormente, se presentan los diferentes métodos de calibración empleados en el trabajo para transformar los datos adquiridos por el escáner de medida a unas coordenadas que permitan realizar correcciones sobre el proceso. Se evalúan diferentes métodos adecuados a cada configuración del escáner en la celda de fabricación, ya sea en una posición fija como móvil, es decir, montado sobre el robot. Finalmente, se presentan las aplicaciones que la medida tridimensional puede ofrecer como asistencia al proceso LMD y a las operaciones de post-procesado.

El séptimo capítulo presenta las metodologías de control de altura desarrolladas en este trabajo. La primera metodología consistente en la decisión de las capas a aportar, calculadas antes del proceso, en función del crecimiento de la pieza. Para ello, se fabrican piezas con y sin la aplicación del control y se comparan los resultados contra la geometría teórica. En la segunda metodología alternativa de control de altura de la pieza, en lugar de generar las trayectorias de aporte previamente al comienzo del proceso, éstas son generadas durante la fabricación, en función del crecimiento de la pieza. De esta forma es posible fabricar el componente en un lazo cerrado en el que se escanea la superficie superior de la pieza y se calculan las trayectorias de aporte de un grupo determinado de capas ajustando los parámetros de crecimiento. Finalmente, el último método de control desarrollado, consistente en la adaptación de la tasa de aporte de forma local en función del crecimiento de la pieza en sus diferentes zonas. De esta forma es posible no sólo adaptar el crecimiento global de la capa sino actuar sobre las desviaciones de altura que pueden darse dentro de la capa.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Por último, en el octavo capítulo se presentan las conclusiones del trabajo y las líneas futuras de trabajo, además de las aportaciones realizadas a congresos y revistas con el contenido desarrollado en la tesis doctoral.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Capítulo 2. Análisis del estado del arte de la monitorización y control del proceso LMD

2.1. Introducción

Desde mediados de los 90, el proceso de aporte de material metálico por láser ha sido utilizado generalmente para la reparación o recubrimiento de piezas previamente fabricadas por otros medios. En los últimos años, sin embargo, esta técnica ha despertado el interés de diversos sectores, como el aeronáutico o el aeroespacial, para la generación de piezas desde cero, dando lugar a un proceso de Fabricación Aditiva (FA) denominado Laser Metal Deposition (LMD).

En este capítulo, en primer lugar, se presenta una reflexión sobre las características principales que convierten al LMD en un proceso de alto interés dentro del resto de técnicas de FA con las que compete, además de una introducción al aporte de material mediante láser con la definición de los parámetros de proceso fundamentales.

Por otro lado, se muestran las configuraciones de aporte existentes en cuanto a la disposición del material de aporte y del haz láser de proceso, así como del formato del material aportado. En este sentido, se realiza una comparativa entre los procesos con aporte de polvo e hilo metálico, mostrando las bondades y dificultades de ambas opciones.

Posteriormente, se realiza una descripción de los sistemas de movimiento utilizados para generar las trayectorias de aporte de material, teniendo en cuenta aspectos como la precisión obtenida en el movimiento, la flexibilidad que otorgan en términos de tamaño de pieza o de adaptación a geometrías de diferente complejidad o el coste. Asimismo, se describen brevemente las soluciones para generar las trayectorias de aporte de material y algunos aspectos específicos de las tecnologías de aporte empleadas en este trabajo que hacen necesarios nuevos desarrollos de software específicos al proceso LMD.

Una vez realizado un análisis del proceso, se analizan los diferentes estudios relacionados con la monitorización y control del proceso, explicando la necesidad de incorporar diferentes tipos de sensores en proceso para garantizar la estabilidad de la fabricación y el control de la calidad de la pieza. Para ello, se presenta un estado del arte de las técnicas empleadas para la monitorización, tanto térmica como geométrica, del proceso. La recopilación de los trabajos introducidos se ha

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

clasificado en subapartados en función del principio de medida, ya sea por visión mediante cámaras con diferentes rangos de medida, medida de distancias por triangulación o por otros métodos alternativos.

Finalmente, se presenta una conclusión de los aspectos descritos en este capítulo, para terminar con el planteamiento de los objetivos y alcance de este trabajo.

2.2. Aporte de material mediante Laser Metal Deposition (LMD).

Principales características y parámetros fundamentales de aporte

El proceso LMD se basa en la aplicación de un haz láser que funde un material base o sustrato, junto con un material aportado en forma de polvo o hilo metálico (Figura 9). Cuando el baño es fundido y posteriormente se enfría hasta solidificar, el material de aporte queda unido por fusión al sustrato. Mediante la incorporación de un sistema de movimiento (robot o máquina) se realizan sucesivas pasadas en las que los cordones individuales quedan solapados. Por medio de la superposición de varias capas es posible fabricar una pieza totalmente densa [13].

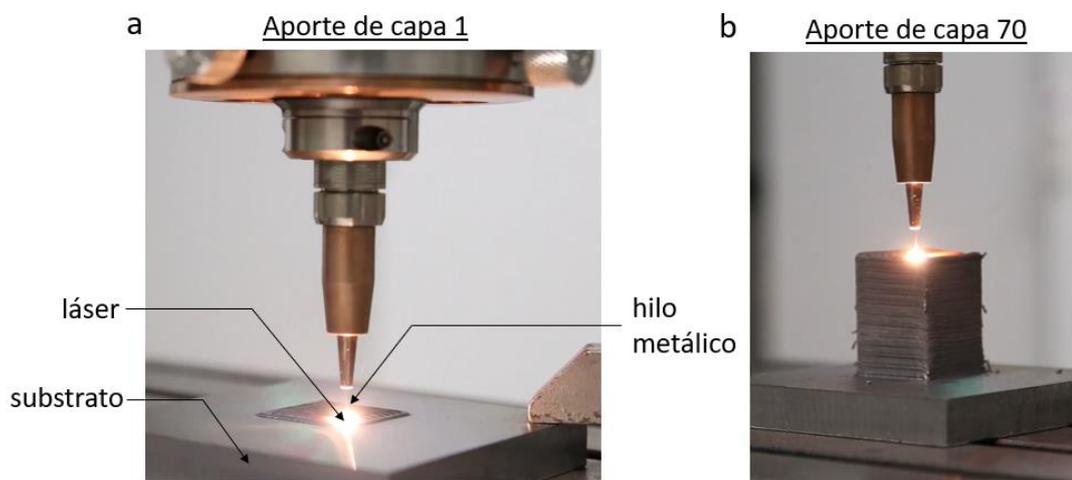


Figura 9. Proceso LMD con aporte de hilo metálico. a) Aporte de la primera capa formada por la fusión de cordones de soldadura solapados; b) estado de la pieza en el aporte de la capa número 70 tras superponer las anteriores capas una encima de la anterior.

La principal característica de este proceso es la capacidad de generar geometrías complejas con gran flexibilidad, aportando material únicamente en el volumen de la pieza final donde es necesario. De esta forma, el ahorro de material respecto a los procesos de fabricación convencionales (combinación de forja o fundición con mecanizado) puede ser importante [13, 14]. Este hecho se manifiesta especialmente en materiales caros o difíciles de mecanizar como algunas aleaciones metálicas con base titanio, níquel o aluminio empleadas en la industria aeronáutica o aeroespacial.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Según la norma ISO/ASTM 52900:2015 el proceso LMD se encuentra dentro de la categoría de técnicas de fabricación aditiva Directed Energy Deposition (DED) [16]. Esto quiere decir que el material de aporte se fusiona a medida que se está insertando el material en el baño fundido. Las técnicas DED se diferencian de las técnicas Powder Bed Fusion (PBF) en que, en éstas, el polvo se encuentra pre-depositado y es posteriormente fundido con una fuente de energía, ya sea láser (Selective Laser Melting, SLM) o haz de electrones (Electron Beam Melting, EBM). Las principales ventajas del proceso LMD respecto de las tecnologías PBF son una mayor tasa de aporte y la posibilidad de generar piezas de mayor tamaño sin la necesidad de un gran volumen de material en la cama de polvos. Sin embargo, el acabado de las piezas realizadas por LMD es generalmente peor que en el caso de las técnicas PBF, requiriendo de una operación de mecanizado posterior para alcanzar el acabado final de la pieza. Por otro lado, la complejidad geométrica de las piezas alcanzable con el proceso LMD también es menor que en el caso de los métodos PBF.

Dentro de las tecnologías de fabricación aditiva DED también existen otras tecnologías alternativas al LMD. Por un lado, se encuentra el proceso Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), en el que el material en forma de hilo es fundido por un arco eléctrico. Algunas de las empresas que comercializan máquinas que trabajan con este proceso de FA son Addilan [17], Norsk Titanium [4], RAMLAB [18] o Gefertec [19]. Las tasas de aporte alcanzables con este proceso son mayores que para el LMD, mientras que la precisión geométrica de las piezas se ve disminuida. Además, el hecho de alcanzar unas tasas de aporte superiores da lugar a que el aporte térmico sea muy superior y más difícil de controlar, generando un nivel superior de tensiones residuales y distorsiones geométricas en la pieza [20]. Por otro lado, se encuentra el Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) comercializado por los fabricantes Sciaky [21], Cambridge Vacuum Engineering (CVE) [22] o Steigerwald Strahltechnik (SST) [23], en el que un haz de electrones funde el material en una atmosfera de vacío con una tasa de aporte similar al WAAM. Tanto en el EBAM como en el WAAM el aporte del material es en forma de hilo introducido de forma lateral, lo que limita la complejidad geométrica alcanzable en las piezas fabricadas.

Comparando con sus principales alternativas se puede concluir que el LMD se encuentra a mitad de camino entre las técnicas PBF, caracterizadas por una tasa de aporte menor y una elevada complejidad geométrica alcanzable, y las tecnologías

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

de aporte WAAM y EBAM, en las que la tasa de aporte es notablemente mayor a costa de una mayor limitación geométrica y mayor distorsión de las piezas fabricadas. En definitiva, el LMD encuentra su aplicación en geometrías de medio a gran tamaño con una complejidad geométrica moderada. En la Figura 10 pueden observarse piezas fabricadas mediante las tecnologías WAAM, LMD y SLM.



Figura 10. Piezas fabricadas por diferentes tecnologías de FA metálica. Pieza fabricada por Addilan mediante la tecnología WAAM [17], LMD por Tekniker y SLM por Trumpf [24].

El aporte de material en el proceso LMD puede realizarse tanto en forma de polvo como de hilo metálico. Aunque se han utilizado diferentes terminologías para denominar al proceso de aporte láser, según el fabricante o las particularidades del proceso, en la redacción de este trabajo se ha adoptado el término LMD-P para el aporte de material en forma de polvo y LMD-W para el caso de aporte en forma de hilo metálico. Por otro lado, en los casos en los que simplemente se menciona el término LMD se refiere al proceso ya sea con aporte de hilo o de polvo metálico.

En el caso de la mayoría de los cabezales de aporte mediante el proceso LMD-P, el láser de proceso, una vez colimado, es dirigido en la dirección normal a la superficie a aportar. El polvo, por otro lado, es inyectado lateralmente y, gracias a la interacción con el láser, es fundido y adherido al sustrato (Figura 11a).

Por el contrario, en el caso de los cabezales de LMD-W, normalmente el hilo metálico es el que se inserta en la dirección normal a la superficie, mientras que el láser es enfocado lateralmente con cierto ángulo respecto a él. Para obtener un aporte independiente de la dirección de movimiento es necesario dividir el haz láser principal para después enfocararlo desde varias direcciones, para lo que se emplea un sistema óptico compuesto de lentes, espejos y prismas (Figura 11b).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

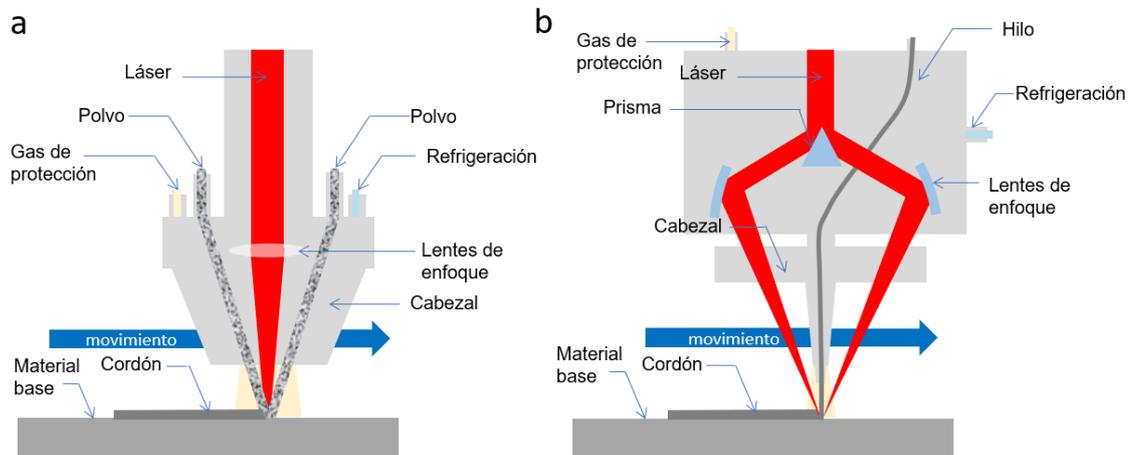


Figura 11. Esquema de la configuración de los cabezales de aporte de LMD-P y LMD-W. a) Cabezal de LMD-P; b) cabezal de LMD-W.

De cara a evitar la oxidación de los cordones de soldadura, el baño fundido es protegido mediante un flujo continuo de argón a través de la boquilla de aporte tanto de LMD-P como de LMD-W. Igualmente, los cabezales cuentan con refrigeración interna de los elementos ópticos que los componen. Por otro lado, mientras que estas configuraciones son las más comunes en la fabricación aditiva de piezas con el proceso LMD, en el apartado 2.3 se muestran variaciones en los cabezales de aporte en función de la configuración del material de aporte y del láser de proceso.

Independientemente del formato de material empleado para realizar el aporte, existen algunos conceptos que son comunes tanto para el proceso LMD-P como para el LMD-W. Los principales parámetros de entrada del proceso son la potencia láser, la velocidad de avance del robot o máquina y la tasa de aporte de material. Por otro lado, existen otros parámetros que, aunque son importantes en conjunto para una aplicación correcta del proceso, son considerados como secundarios, bien por su menor influencia en la calidad del aporte, porque son característicos del sistema de aporte o porque generalmente son fijados en una etapa previa a la búsqueda de los parámetros óptimos de aporte. Algunos de estos parámetros de entrada son enumerados en la Figura 12 [13].

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

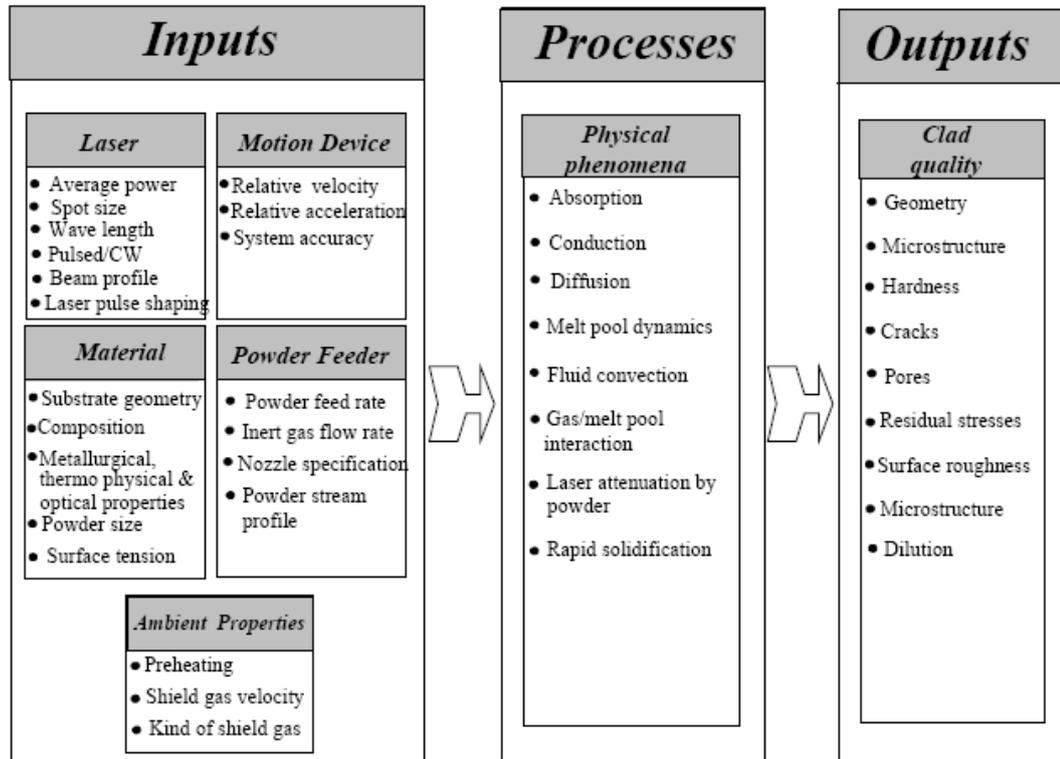


Figura 12. Variables de entrada, proceso y salida en el proceso LMD [13].

La combinación de unos parámetros de entrada adecuados es fundamental para obtener un cordón de aporte correcto y generar un aporte estable y de calidad. Un cordón aportado por LMD se caracteriza por los parámetros dimensionales de la Figura 13, donde se presenta la sección transversal de un cordón individual en el que h es el alto del cordón, w el ancho, b la dilución y θ el ángulo de mojado.

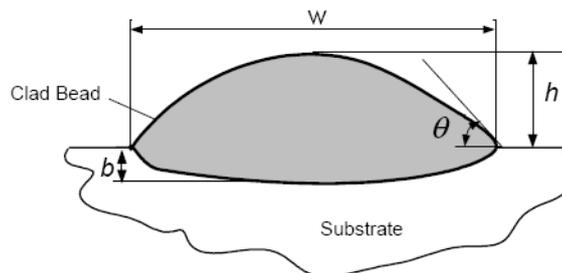


Figura 13. Parámetros dimensionales de un cordón aportado por LMD [13].

En muchas ocasiones la búsqueda de unos parámetros de aporte óptimos consiste en una metodología de prueba-error en la que se aportan cordones con una serie de combinaciones de parámetros hasta encontrar aquellos que dan una dilución

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

moderada, una relación de aspecto adecuada, ausencia de defectos internos y una tasa de aporte máxima.

Existen numerosos trabajos en los que se ha tratado de determinar las ventanas de parámetros adecuadas para una determinada combinación de materiales, ya sea variando los diferentes parámetros y analizando la integridad de la pieza [25], mediante métodos estadísticos [26, 27] o a través de modelos analíticos o numéricos [28]. Sin embargo, existen características de cada proceso, particularidades de cada equipamiento o diferencias en el material empleado que dificultan la generalización de unos parámetros de aporte entre diferentes sistemas de fabricación.

2.3. Variantes del proceso de aporte por láser en función del tipo de material de aporte: LMD-P y LMD-W

La mayoría de los cabezales de aporte comercializados emplean polvo como material de aporte [29, 30]. En la Figura 14 pueden verse las diferentes configuraciones de aporte de polvo de las boquillas fabricadas por la empresa Precitec [29]. La Figura 14a, en la que el material se introduce de forma uniforme en todas las direcciones se denomina aporte continuo. Por otro lado, en la Figura 14b el material se aporta de manera lateral, limitando su uso a casos en los que la dirección de aporte sea fija. Finalmente, la Figura 14c muestra una boquilla de aporte discreto, denominada de esta forma debido a que el polvo se inyecta desde diferentes puntos alrededor del láser de proceso. Una comparativa entre los diferentes tipos de aporte fue llevada a cabo por Arrizubieta et al. [31], concluyendo que un aporte continuo mejora la omnidireccionalidad del proceso, al mismo tiempo que encarece el sistema debido a la mayor complejidad de la geometría interna de la boquilla de aporte.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

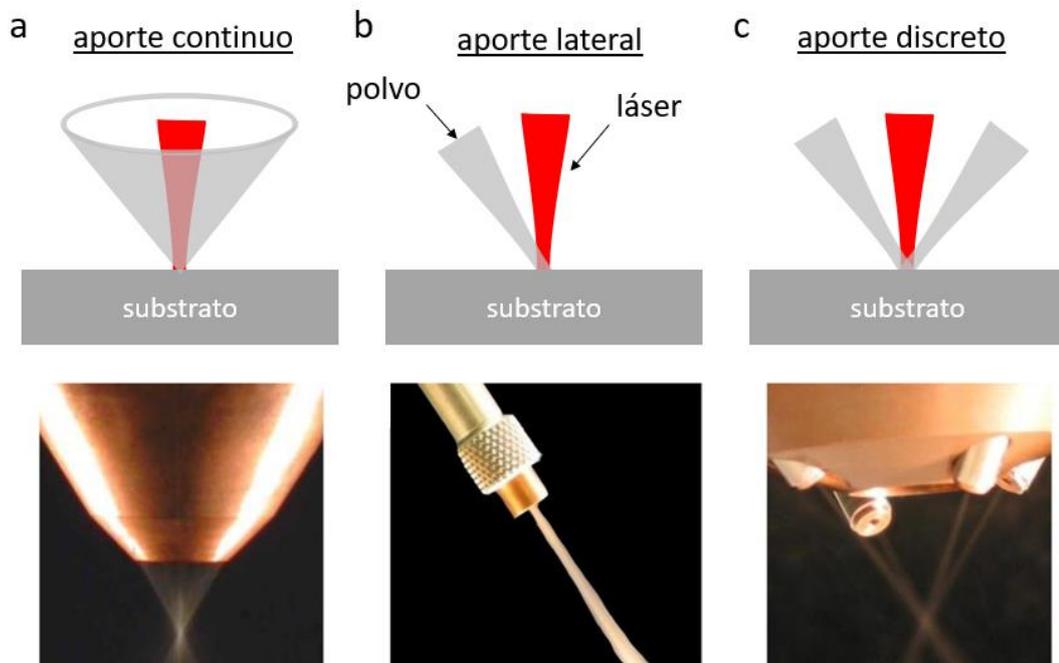


Figura 14. Diferentes configuraciones de los cabezales de aporte LMD-P de la empresa Precitec [29]. a) Aporte continuo; b) aporte lateral; c) aporte discreto.

En otros casos, el material de aporte empleado es en forma de hilo metálico. Al igual que en el caso polvo, existe la posibilidad de insertar el hilo de forma lateral [32–34]. El láser en este caso, al igual que en el LMD-P, debe incidir perpendicularmente a la superficie, mientras que el hilo se inyecta con cierto ángulo respecto a él, como puede verse en la Figura 15a. El inconveniente, de nuevo, es la dependencia de la dirección de aporte. Por otro lado, en los últimos años se han desarrollado cabezales de aporte que aportan el hilo perpendicularmente a la superficie, de modo que se consigue un aporte omnidireccional. Como el hilo metálico se inserta en el eje del cabezal (aporte de hilo coaxial), no es posible introducir el láser en el mismo eje, por lo que es necesario dividir el haz para después volverlo a enfocar en el plano de trabajo, empleando diferentes elementos ópticos para ello. Uno de los principales cabezales de hilo coaxial es el desarrollado por Fraunhofer IWS [35], en el que el haz colimado es dividido en tres haces mediante un prisma (láser discreto) para después volver a converger en un único spot laser (Figura 15b). Otra solución es la empleada por la empresa Precitec [36], donde el haz colimado incide sobre un cono generando una corona circular, que posteriormente se divide en dos para después volver a ser enfocada en el plano de trabajo (Figura 15c). El hecho de dividir la corona circular en dos implica que es necesario llevar el hilo dentro de la corona. Aunque por el momento no existe una

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

comparativa entre los sistemas de aporte de hilo coaxial mediante haz discreto y continuo, se puede intuir que el haz continuo podría ofrecer un aporte más omnidireccional que el discreto.

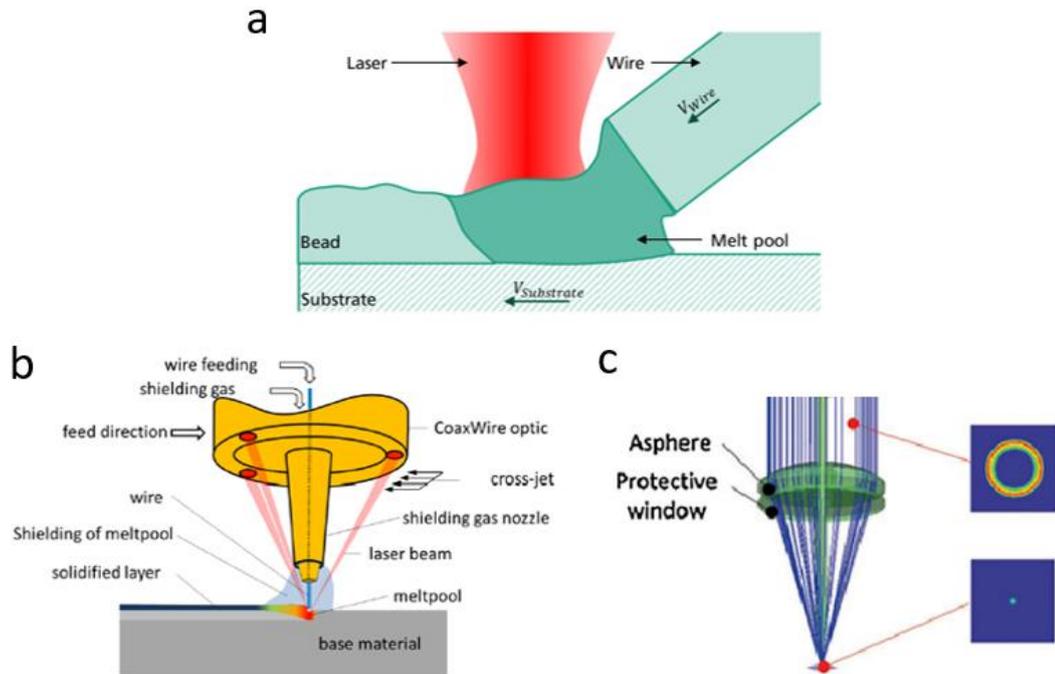


Figura 15. Configuraciones de aporte de hilo metálico en el proceso LMD-W. a) Hilo lateral [33]; b) hilo coaxial y láser discreto [35]; c) hilo coaxial y láser continuo en forma de corona circular [36].

Otros cabezales de hilo coaxial no comerciales son los desarrollados por Fraunhofer ILT [37], la universidad de Soochow (China) [38–40], la universidad de Ljubjana (Eslovenia) [41, 42] o la universidad de Brandenburgo [43]. Por otro lado, algunos grupos de investigación han tratado de obtener un aporte de hilo lateral omnidireccional. Este es el caso del cabezal desarrollado por Williams et al. de la universidad de Cranfield [44], en el que el hilo tiene la capacidad de rotar alrededor del cabezal, o el presentado por Wu et al. del instituto tecnológico de Beijing [45] en el que el ángulo del hilo respecto al láser varía en función de la dirección de aporte. El comportamiento de estos sistemas ante piezas con diferente complejidad y cambios de dirección no está aún validado además de que, en cualquier caso, estos cabezales introducen un accionamiento adicional que debe ser sincronizado con la dirección de aporte, aumentando la complejidad de la programación de las trayectorias de aporte.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En [46] Arrizubieta et al. realizaron una comparativa entre un aporte realizado por LMD-P y LMD-W con aporte de hilo lateral. Los resultados en cuanto a las propiedades mecánicas y dureza entre los dos procesos no fueron muy diferentes, mientras que el aporte de hilo fue más rápido y mucho más eficiente (92% de eficiencia de material en el caso del hilo respecto al 21% del polvo). Así, el incremento de la tasa de aporte de material, eficiencia y reducción del precio de la materia prima aportada son las principales ventajas del LMD-W.

Madarieta et al. [47], en un artículo enfocado al aporte de material con un cabezal de aporte coaxial, analizaron las problemáticas derivadas del uso de hilo metálico como material de aporte. Entre ellos, se describen los diferentes tipos de defectos que pueden aparecer en este proceso como enganches del hilo o goteo de material debido a parámetros inadecuados, fallos por desenfoque del haz laser o los defectos comunes a todos los aportes por LMD como faltas de unión, dilución excesiva o distancia de solape entre cordones incorrecta.

Entre las mayores ventajas del empleo de hilo como material de aporte se encuentra el ya mencionado incremento de la eficiencia del material aportado. Mientras que en el caso del polvo el rendimiento del material aportado respecto al aportado toma un rango aproximado entre el 20% y el 80%, en función del sistema de fabricación y los parámetros empleados, en el caso del hilo la práctica totalidad del material aportado en el proceso es fundido y forma parte de la pieza final, dando lugar a una eficiencia cercana al 100%.

Otra de las ventajas del hilo frente al polvo como material de aporte es la mayor limpieza del sistema de fabricación y la reducción del riesgo para la salud de los operarios. El tamaño de las partículas de polvo, del orden de 25 a 145 μm puede suponer un problema para el sistema respiratorio, piel, ojos y mucosas [48]. Por ello, el empleo de equipos de protección individual es fundamental para la salud del operario. Así mismo, es necesario almacenar el polvo en lugares secos y aislados para evitar su degradación e incluso incendios o explosiones.

Por último, el precio de la materia prima en forma de hilo es sustancialmente inferior al polvo metálico. En la comparativa realizado por el fabricante de equipos EBAM Sciaky [49] puede observarse cómo el precio de material en forma de polvo para diferentes materiales es del orden de un 100% más caro que en forma de hilo. La Tabla 1 presenta esta comparativa realizada para diferentes materiales de aporte y que fue posteriormente resumida en [47].

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Raw material	Titanium 6Al-4V	Tantalum	Inconel 625	Stainless steel 316
Wire, 0.9 mm (0.035") diameter	€105/kg	€960/kg	€ 47/kg	€9.15/kg
Wire, 1.1 mm (0.045") diameter	€100/kg	€960/kg	€41/kg	€8.16/kg
Powder	€210/kg	€920/kg	€84/kg	€18/kg

Tabla 1. Precio de materiales en forma de polvo e hilo en una comparativa realizada por Sciaky [49] y posteriormente resumida en [47].

Sin embargo, el empleo de hilo como material de aporte también introduce dificultades en el proceso, lo que hace que sea un proceso menos flexible que el LMD-P. Algunos autores han tratado de evaluar la influencia del desenfoque del flujo de polvo y del haz laser sobre el resultado de la pieza final [50, 51]. Estos trabajos no solo demuestran que es posible trabajar a una distancia entre boquilla y pieza no óptima, sino también que reducir esta distancia puede dar lugar a un proceso más estable. En estas situaciones el crecimiento de la pieza está limitado a la distancia que se mueve el cabezal verticalmente entre capas. Esto hace que, en el caso en que se dé una desviación de altura tanto por encima de la altura ideal como por debajo, se produzca un efecto de auto compensación que propicia que se retome un aporte plano. Este aumento de la estabilidad en proceso trae por el contrario una disminución de la eficiencia del proceso, debido a que el hecho de limitar el crecimiento de la pieza con una menor distancia entre boquilla y pieza resulta en una gran cantidad de polvo no fundido. Esta característica puede ser aprovechada en el caso de procesos de aporte de material en geometrías con cierto grado de complejidad, aplicando el proceso LMD-P.

En el caso del hilo, las consecuencias de una distancia entre cabezal y pieza incorrectas son analizadas en [36] y [47], llegando a la conclusión de que esta distancia debe ser en todo momento la óptima, de cara a evitar los enganches de hilo y el goteo de material. Esto supone una limitación añadida a la flexibilidad del proceso LMD-W a la hora de generar piezas con cierta complejidad. Así, en el caso en el que se puedan mantener las condiciones de aporte estables y la geometría pueda fabricarse con movimientos unidireccionales, el LMD-W puede ser más adecuado que el polvo, dada la mayor eficiencia de aprovechamiento de material, el menor coste del material en forma de hilo y, por lo general, las mayores tasas de aporte respecto al LMD-P.

Los cabezales de aporte de hilo coaxial recientemente desarrollados, aparte de contar con una menor madurez y un mayor precio respecto a sus homólogos de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

polvo, introducen una complejidad extra sobre la estabilidad del proceso debido a la necesidad de dividir el haz para después volver a enfocarlo en el plano de trabajo. En la Figura 16 puede observarse la evolución de la forma que toma el láser con tres colimadores diferentes en planos tomados a diferentes alturas de trabajo, recogidos en [52]. Los planos obtenidos a diferentes alturas muestran una gran sensibilidad en el cambio del tamaño del láser ante la variación de la altura de aporte, además del hecho de que el desenfoque de láser no solo lleva consigo un aumento del tamaño de la zona donde este incide, sino además un cambio de forma lo que puede afectar a la direccionalidad del proceso.

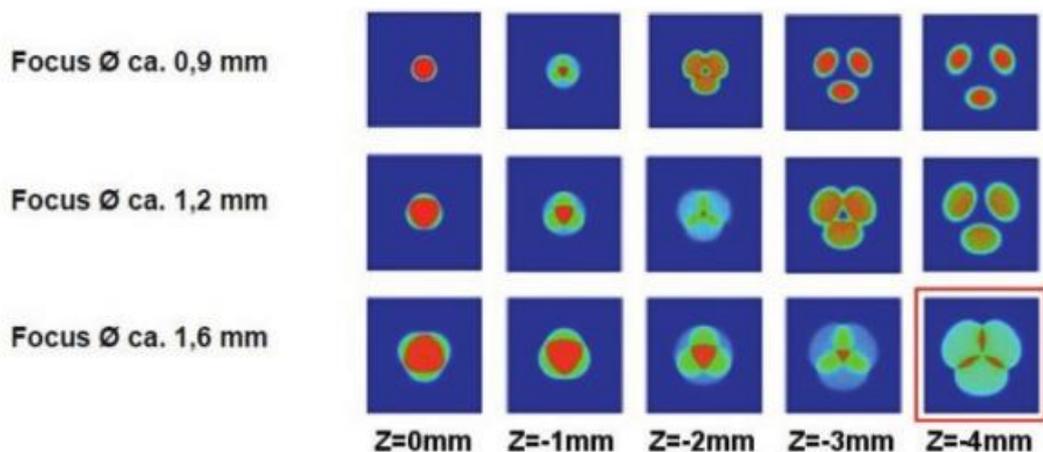


Figura 16. Evolución de la forma y tamaño del spot láser respecto de la distancia focal para tres colimadores diferentes [52].

Para entender la diferencia del desenfoque láser entre los sistemas LMD-W con hilo coaxial y los de LMD-P o LMD-W con hilo lateral se presenta una caracterización láser obtenida mediante un analizador de haces FocusMonitor del fabricante PRIMES sobre un láser de proceso Rofin DY022 (Figura 17). Como puede observarse, el haz laser converge generando un spot laser de 0,6 mm de diámetro para luego volver a divergir. A cierta distancia del foco, la evolución del tamaño del spot se ajusta a la recta $R=0,0828x-16,383$, donde R es el radio del spot laser en milímetros tomando como criterio el del círculo que abarca el 86% de la energía láser y x es la distancia del plano del spot respecto de una referencia fija en el cabezal. En este caso, el cambio de tamaño del láser al variar 1 mm el plano de trabajo corresponde a 0,0828 mm de variación en el radio del spot, siendo el ángulo con el que diverge el láser de $4,73^\circ$ respecto de la vertical. Por otro lado, se mantiene la forma circular del spot laser.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

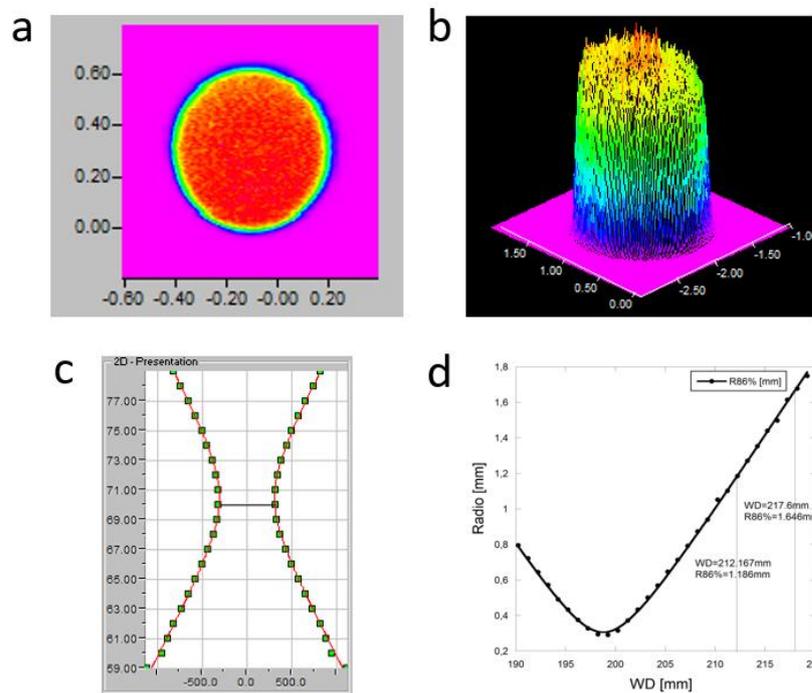


Figura 17. Caracterización de láser empleado en el proceso LMD. a) Distribución de potencia láser en el foco; b) imagen 3D del foco; c) evolución de la forma del láser a diferentes alturas con el criterio del 86% de la energía; d) radio del spot láser en función de la distancia de trabajo respecto de una referencia fija en el cabezal.

Incluso estando lejos del foco, siendo el caso más desfavorable, la variación de tamaño y forma del spot láser no es comparable a la que se da en los sistemas de aporte de hilo coaxial. En estos, el ángulo respecto de la vertical, con el que los haces divididos inciden sobre el plano de trabajo, es generalmente superior a 20° (Figura 18a). La razón es que existe un ángulo mínimo para evitar la interferencia del láser con la punta de la boquilla y que está marcada por la limitación impuesta por la fabricación de la boquilla (Figura 18b). Podría pensarse en reducir al mínimo el diámetro de la boquilla en su salida haciéndola, por ejemplo, igual al diámetro del hilo, pero esto afectaría a la durabilidad de las boquillas. Por otro lado, cabe la posibilidad de aumentar la distancia entre boquilla y sustrato (Figura 18c), aunque esto puede afectar a la estabilidad del proceso, ya que deriva en un mayor movimiento del hilo y, debido a la curvatura del hilo, en una mayor desviación respecto del centro del spot láser. En definitiva, interesa reducir la distancia entre boquilla y pieza al mínimo, al mismo tiempo que reducir el ángulo de los haces respecto de la vertical, siendo ambas acciones contrapuestas a la hora de evitar la interferencia entre boquilla y láser de proceso. Por otro lado, además del ángulo

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

formado por los diferentes haces, habría que tener en cuenta el propio desenfoque de cada uno de los haces por separado.

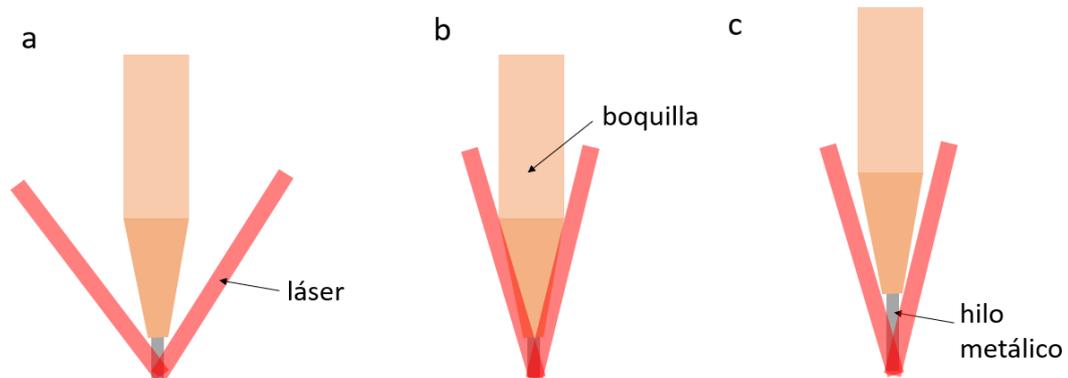


Figura 18. Esquema de la disposición de láser, boquilla de aporte e hilo en cabezal de aporte de hilo coaxial. a) Disposición normal sin interferencias; b) interferencia entre láser y boquilla por un ángulo del láser excesivamente estrecho; c) aumento de la distancia entre boquilla y superficie de aporte para evitar la colisión entre boquilla y láser.

Esto supone una limitación de los cabezales de hilo coaxial existentes, que debe analizarse tanto en términos de estabilidad durante el aporte ante cambios de altura como a la direccionalidad del proceso al producirse un desenfoque del haz.

Como última diferencia entre los formatos del material de aporte puede mencionarse que mientras que el hilo metálico cuenta con estándares de calidad, procedentes mayoritariamente de los procesos de soldadura, suficientemente estandarizados y certificados por los fabricantes de piezas de sectores como el aeronáutico o aeroespacial, en el caso del polvo metálico aún no ha sido definido un estándar que asegure la calidad de la materia prima. Esto puede dar lugar a que el polvo cuente con una distribución de formas o tamaños de partículas, o incluso de impurezas que se transmitan a la pieza aportada, dando lugar a defectos internos que afecten a su integridad.

2.4. Sistema de movimiento y generación de trayectorias LMD

Una parte fundamental de un sistema de fabricación aditiva mediante LMD es el movimiento del cabezal de aporte a lo largo de las trayectorias definidas para generar la pieza. Los sistemas de movimiento empleados en el proceso LMD son en la práctica totalidad de los casos las máquinas de cinemática cartesiana de control numérico por computadora (CNC) y los robots industriales antropomórficos.

En el caso de las máquinas CNC, la arquitectura no suele diferir mucho de la de un centro de mecanizado. Algunos de los fabricantes que comercializan máquinas de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

LMD-P, como Optomec [53], DM3D Technology [54] o BeAM [55], entre otros, emplean sistemas basados en máquinas cartesianas. En algunos casos, incluso se han llegado a combinar los procesos de FA DED con tecnologías substractivas, dando lugar a lo que se denomina Fabricación Híbrida, como es el caso de los equipos desarrollados por los fabricantes de máquinas IBARMIA [56], Hamuel Reichenbacher [57], DMG Mori [58] o Mazak [59], entre otros. A lo largo de las últimas ferias de máquina herramienta se ha observado una proliferación de estos equipos, destacando la última feria EMO, celebrada en Hannover a lo largo de septiembre de 2019, en la que se expusieron hasta 8 sistemas híbridos diferentes. Habitualmente, se aprovechan estructuras de máquinas de mecanizado sobre las que se instalan los sistemas necesarios para realizar el proceso LMD. Las configuraciones más habituales incorporan 5 ejes, ya que para aplicar el proceso LMD de manera óptima, especialmente sobre superficies complejas, es necesario orientar el cabezal de aporte en la dirección normal a la superficie del sustrato.

Por otro lado, se encuentran los robots industriales empleados en FA, consistentes, por lo general, de 6 o más articulaciones o ejes colocados en serie, de manera que, de forma análoga al brazo humano, es posible alcanzar las posiciones del espacio de trabajo con diferentes orientaciones. Al igual que en el caso de las máquinas CNC, es posible incorporar un posicionador en el que situar la pieza para reorientarla y evitar un movimiento excesivo de reorientación en el cabezal al fabricar piezas con inclinaciones de pared [60]. De esta forma, es posible generar piezas con gran complejidad manteniendo el cabezal con una orientación vertical constante.

En algunos casos, la complejidad de la geometría de la pieza es la que determina la arquitectura de máquina o robot necesaria para la fabricación. Puesto que el proceso LMD genera una preforma que posteriormente debe ser mecanizada, en algunos casos es suficiente con una programación de trayectorias en 3 ejes. En estos casos, es suficiente con una máquina cartesiana sin reorientación del cabezal o mesa giratoria. Por otro lado, algunas piezas cuentan con una mayor complejidad, como paredes inclinadas o la necesidad de aportar material en diferentes direcciones, por lo que requieren de una programación de trayectorias en 5 o más ejes. Para ello, es posible emplear máquinas con reorientación del cabezal o con mesa giratoria para contar con una configuración de máquina de 5 ejes. Igualmente, un robot industrial ofrece una gran flexibilidad para poder generar geometrías de diferente complejidad

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

gracias a los 6 o más grados de libertad dispuestos en serie, o incluso a la capacidad de instalar un posicionador de pieza con ejes de giro adicionales.

La Figura 19 presenta piezas con una complejidad geométrica ascendente, en la que la orientación del cabezal de aporte en diferentes puntos de la pieza es ilustrada mediante flechas rojas. En el caso de la Figura 19a la pieza puede ser generada con una trayectoria en 3 ejes con una orientación del cabezal constante. Por el contrario, la pieza de la Figura 19b cuenta con paredes inclinadas que pueden causar que el material fundido caiga debido al efecto de la gravedad, por lo que puede ser necesario emplear una trayectoria de 5 ejes con reorientación del cabezal. Por último, la pieza de la Figura 19c únicamente podría ser generada estableciendo diferentes direcciones de crecimiento. Por este motivo, la configuración preferible sería la combinación de una reorientación del cabezal en 5 ejes junto con posicionamiento de la pieza mediante dos ejes de giro adicionales.

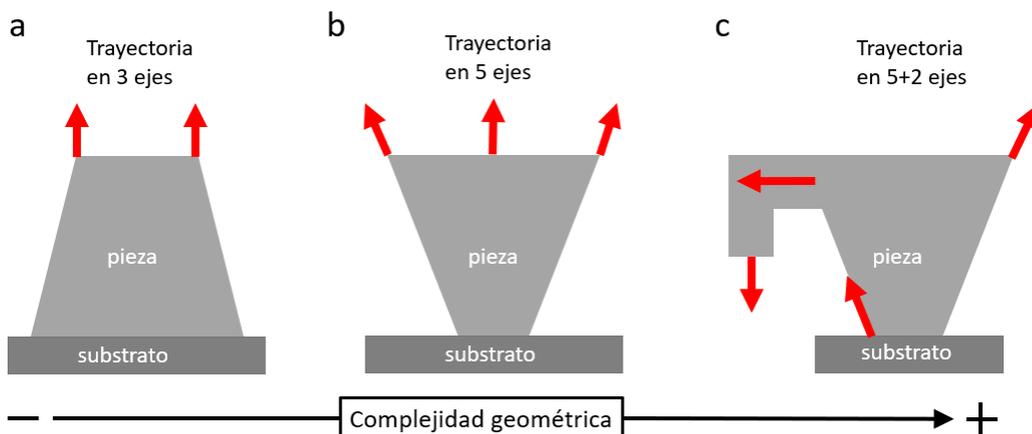


Figura 19. Piezas con diferentes grados de complejidad y trayectorias de aporte adecuadas para su fabricación. a) Pieza fabricable mediante trayectorias en 3 ejes; b) pieza con paredes inclinadas en la que son necesarias trayectorias en 5 ejes; c) pieza con diferentes direcciones de crecimiento en la que son necesarios ejes de giro adicionales.

Por otro lado, al contrario que en una máquina, en la que el tamaño de la pieza está limitado al volumen interior de la máquina, una célula robótica no impone restricciones del tamaño de pieza, siendo la única limitación el alcance del robot a las diferentes posiciones. Este aspecto puede ser crítico en aplicaciones en las que la FA se emplea para generar aportes sobre piezas base de gran tamaño o para tareas de reparación de componentes de tamaño medio o grande. En algunos casos, el robot de aporte ha sido montado sobre ejes adicionales para aumentar el volumen de trabajo de la celda robótica. En el proyecto KRAKEN [61], dentro del programa

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

H2020 de la Unión Europea, se presenta el sistema de fabricación híbrida mostrado en la Figura 20, en el que un robot montado en posición invertida sobre dos guías es capaz de fabricar piezas de hasta 20 metros de largo con cambio automático de cabezal de mecanizado y fabricación aditiva tanto de material metálico como polimérico.

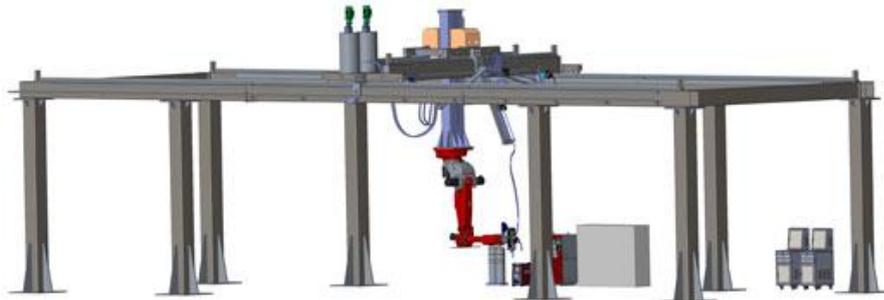


Figura 20. Sistema de FA desarrollado en el proyecto KRAKEN dentro del programa H2020 de la Unión Europea [61].

Por último, el precio de un robot industrial es, por lo general, inferior al de una máquina CNC. Sin embargo, la flexibilidad de un robot a un precio generalmente inferior al de una máquina destinada a una aplicación similar viene contrarrestada por una precisión de movimiento inferior al de las máquinas cartesianas.

Otro aspecto directamente relacionado con el movimiento en un sistema de FA es la programación de las trayectorias del proceso LMD. Actualmente, los paquetes de software específicos para la generación de trayectorias en procesos DED están en fase de desarrollo, aunque existen algunas soluciones enfocadas al proceso DED como DCAM de la empresa SKM Informatik [62], el módulo de FA para el software NX de Siemens [63] o Bezzier de Autodesk [64]. Por lo general, se trata de proveedores de software CAM que han sido adaptados a los métodos de FA DED. Sin embargo, debido a las grandes diferencias entre la fabricación aditiva y la substractiva, existen aún aspectos que deben mejorar a la hora de generar determinadas geometrías por FA.

Por un lado, las trayectorias de relleno de las piezas cobran una importancia fundamental en la FA, ya que afectan directamente al calentamiento de la pieza y, por lo tanto, a las tensiones residuales, microestructura y direccionalidad de las propiedades mecánicas de las piezas generadas [65–67]. Además, aspectos como la distancia entre cordones adyacentes en la trayectoria de aporte afectan a la integridad de la pieza final. Mientras que en el caso del mecanizado, una distancia

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

entre pasadas variable únicamente afecta a la profundidad de pasada axial, lo que puede favorecer un desgaste prematuro de la herramienta de corte, una distancia entre cordones incorrecta en el caso de las tecnologías DED influye en el solape entre ellos pudiendo dar lugar a defectos internos [68]. Por otro lado, en piezas macizas con una mayor complejidad geométrica, puede ser necesario combinar patrones de relleno en trayectorias de 3 ejes con perímetros exteriores en 5 ejes. Esto es otro aspecto que diferencia a la FA de los CAM de mecanizado, ya que en piezas complejas este último suele separar las operaciones con trayectorias de 3 ejes, habitualmente para hacer un desbastado de material, y las de 5 ejes, que se realizarían una vez hecha la operación de desbastado para dar el acabado final a la pieza.

Existen diversos artículos sobre los patrones de aporte y la mejora de estos aplicados a la FA [69–71]. En general, los patrones de relleno tratan de equiparar las propiedades de la pieza en al menos dos de las direcciones de la pieza, por lo que la práctica habitual es rotar la dirección de aporte 90 grados entre cada capa. En [72] Tang et al. realizaron una adaptación de un software de mecanizado para generar las trayectorias de aporte revirtiendo la dirección del movimiento. Para evitar los aspectos mencionados anteriormente se tomó una geometría hueca de manera que se partió de una operación de mecanizado de acabado en 5 ejes. Otro ejemplo de adaptación de soluciones ya existentes es la realizada por Nilsiam et al. [73], en la que se empleó un software de FA enfocado al aporte de polímeros por extrusión. La razón es que muchos de los patrones de aporte empleados en esta tecnología son aplicables también a las técnicas DED. Esto se evidencia en algunos trabajos enfocados a diversas mejoras en las trayectorias de aporte que, aunque están enfocadas a técnicas de aporte de polímeros, podrían aplicarse en el aporte metálico [74–76]. Por otro lado, existen otros desarrollos generalmente adaptados a cada aplicación concreta que se enfocan en la mejora de las trayectorias de aporte multieje [77–80].

En un trabajo realizado por Flores et al. [81] se desarrolló una solución de generación de trayectorias tanto enfocado a trayectorias de 3 ejes como de 5 ejes aplicado al LMD-P. En la Figura 21a se muestran las mejoras realizadas sobre uno de los patrones de aporte más empleados en la técnica LMD, consistente en un relleno por zig-zag y un perímetro externo. Por otro lado, los sistemas de referencia asignados a cada punto del perímetro de una pieza se muestran en la Figura 21b,

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

correspondiendo con la orientación que debe tomar el cabezal para adaptarse a la inclinación de la pieza en cada punto.

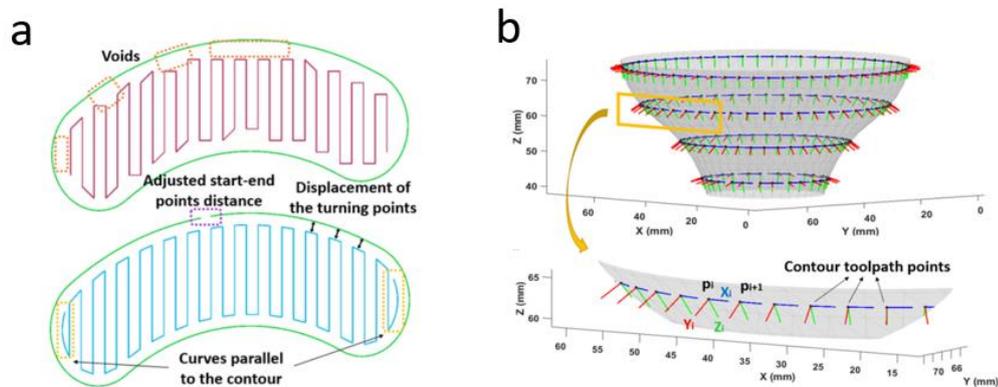


Figura 21. Trayectorias de aporte generadas para el proceso LMD [81]. a) Trayectoria de 3 ejes consistente en patrón de relleno tipo zig-zag y perímetro externo; b) sistemas de coordenadas de los puntos del perímetro indicando la orientación del cabezal en cada punto en función de la inclinación de la pared.

Como conclusión, cabe destacar que, para estudiar la influencia del movimiento sobre la calidad de la pieza aportada, es necesario tener en cuenta tanto los aspectos relacionados con la precisión del sistema de movimiento, ya sea un robot o una máquina, y la influencia de la programación de las trayectorias sobre el movimiento real del robot.

2.5. Monitorización y control de procesos

Monitorizar el proceso consiste en dotarlo de las herramientas necesarias para que el usuario tenga un mejor entendimiento del resultado de los aportes y pueda guiarle durante el proceso de fabricación, permitiendo, por ejemplo, realizar cambios manuales en los parámetros de entrada, o detener el programa cuando se detecta un fallo que no se puede corregir, ahorrando así material y tiempo. Por otro lado, el control del proceso se basa en aprovechar la información de los sistemas de monitorización para variar los parámetros de entrada del proceso y así asegurar la correcta consecución de la fabricación.

En [82] se establece una clasificación de una medida monitorizada en función del momento en el que se realiza y su aplicación. Esta clasificación se resume en la Figura 22.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

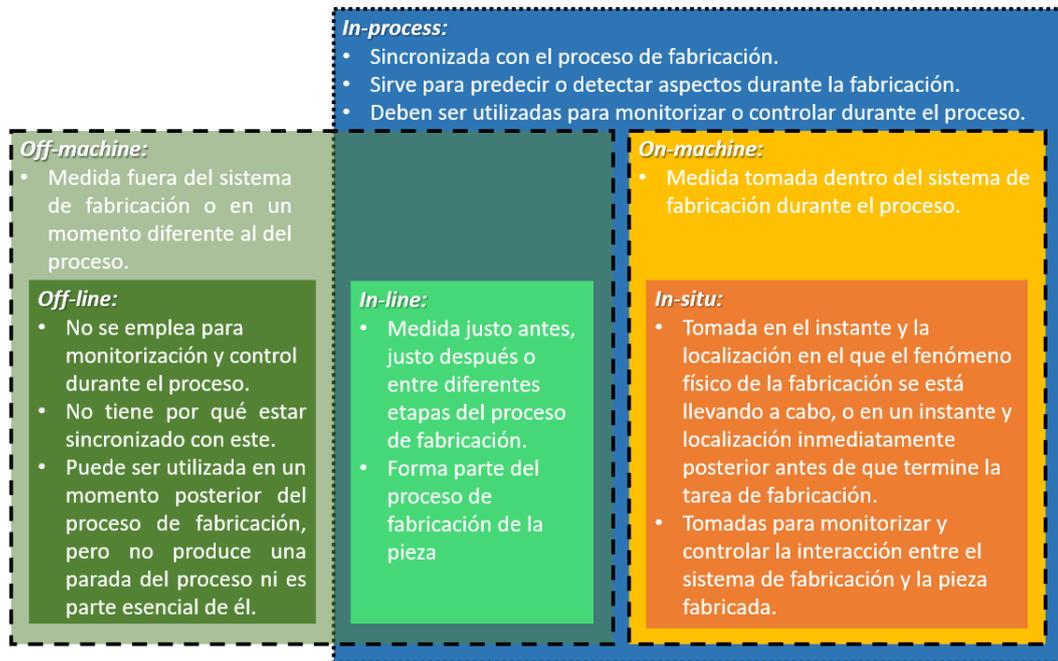


Figura 22. Clasificación del tipo de medida en función del momento de captura y de su empleo en el proceso monitorizado. Esquema generado a partir de [82].

En primer lugar, las medidas pueden ser realizadas dentro del sistema de fabricación durante el proceso (on-machine) o, por el contrario, fuera del sistema de fabricación o en un momento en el que el proceso de fabricación no está siendo llevado a cabo (off-machine).

Las medidas off-machine pueden ser clasificadas en función de su sincronización o no con el proceso. De esta forma, una medida off-machine que no está sincronizada con el proceso de fabricación y que, por lo tanto, no se emplea para monitorizar o controlar durante el proceso se denomina medida off-line. Por otro lado, una medida off-machine que se intercala en diferentes etapas del proceso de fabricación y que, por lo tanto, está sincronizado con este consiste en una medida in-line.

Por otro lado, una medida in-process es aquella que se realiza de forma sincronizada con el proceso de fabricación. Estas medidas sirven para predecir o detectar aspectos durante la fabricación y deben ser utilizadas para monitorizar o controlar durante el proceso.

Finalmente, un caso particular de medida in-process consiste en la medida in-situ. Se trata de un tipo de medida on-machine que adquiere la información del proceso en el instante y la localización en el que el fenómeno físico de la fabricación se está llevando a cabo, o en un instante y localización inmediatamente posterior antes de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

que termine la tarea de fabricación. Estas medidas son tomadas para monitorizar y controlar la interacción entre el sistema de fabricación y la pieza fabricada, siendo apropiadas para realizar un control en tiempo real sobre el proceso.

Las señales monitorizadas son a menudo empleadas para realizar una corrección sobre los parámetros de entrada del proceso, a lo que se le denomina control del proceso. Los métodos de control también pueden ser clasificados en base a cómo se realizan las modificaciones en la entrada del proceso en función del resultado medido [83].

De esta forma, un control en lazo cerrado con feedback es aquel en el que las variables de entrada del proceso se retroalimentan con una señal tomada in-situ. La señal medida se compara con una señal nominal dando lugar a un error, que se multiplica posteriormente por unos valores denominados ganancias para reajustar los parámetros de entrada del proceso. El ajuste de estas ganancias es fundamental para que las correcciones sean rápidas y estables. Los parámetros de entrada suelen incorporar así mismo unos límites para evitar que el proceso se vuelva inestable.

Igualmente, existe el caso particular denominado control coarse-feedback, en el que se emplea una medida in-line en lugar de una medida in-situ. Al igual que en el control feedback común, también llamado fine-feedback, se realizan correcciones en los parámetros de entrada en base a medidas realizadas. Sin embargo, en el caso del proceso LMD estas medidas son tomadas en momentos concretos del proceso en los que no se está produciendo aporte de material, por ejemplo, entre el aporte de una capa y la siguiente. Un caso común es el de, de manera sincronizada, medir la altura a lo largo de la capa y realizar una corrección de la posición del robot en altura para la siguiente capa. En otros casos puede variarse la potencia o la velocidad de aporte a lo largo de la trayectoria de las siguientes capas.

En contraposición con los controles feedback, en los que los parámetros de entrada se retroalimentan con el resultado de la pieza, existen los controles feedforward, donde un modelo predice el resultado del proceso en cada momento en función de los parámetros de entrada y realiza modificaciones sobre estos para obtener el resultado deseado.

Mientras que en un control feedback el conocimiento del proceso no es tan crítico, ya que el sistema actúa en base al error entre el resultado deseado y el que se está obteniendo, en el caso de los controles feedforward el conocimiento del proceso es

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

fundamental para que el control se aplique correctamente. Por otro lado, puesto que en ocasiones puede ser complicado modelizar un proceso con exactitud, suele ser habitual combinar un control feedforward con uno feedback.

2.6. Monitorización y control del proceso LMD

El proceso LMD cuenta con numerosos parámetros, tanto de entrada como de proceso (Figura 12), que influyen en el resultado de la pieza fabricada, lo que convierte en un proceso complejo. En ocasiones, la elección de los parámetros de entrada óptimos es el resultado de una serie de ensayos de prueba y error o de un gran número de ensayos basados en un diseño de experimentos. Sin embargo, la gran sensibilidad de las condiciones de fabricación ante pequeñas variaciones en los parámetros de entrada puede provocar que estos ensayos se alarguen en exceso, o incluso que las condiciones supuestas como adecuadas como resultado de una experimentación previa sobre una geometría simplificada no sean apropiadas en el aporte de la pieza definitiva. Por esta razón, la mayoría de los autores coinciden en que la monitorización y el control del proceso es un aspecto necesario para garantizar la fabricabilidad y calidad las piezas generadas por FA [11].

El objetivo de la monitorización y control del proceso LMD es garantizar la estabilidad geométrica y térmica de las piezas aportadas, reduciendo el número de pruebas fallidas y obteniendo unos elementos completamente densos, con las propiedades mecánicas requeridas y ausencia de defectos internos como poros o grietas. En [2] se realiza una revisión de los métodos de monitorización empleados en diferentes trabajos y los módulos de monitorización incorporados en las máquinas de los principales fabricantes de equipos de fabricación aditiva, tanto para métodos DED como para PBF. Además, se destaca la necesidad de desarrollar nuevos controles in-situ para controlar el proceso en lazo cerrado y detectar discontinuidades en el material aportado. Esto es debido a que, aunque los módulos de monitorización ya se incorporen en la mayoría de las máquinas de FA comerciales, en muchos casos se trata de medidas off-line en las que la información se almacena para un posterior análisis.

En [10] se resumen las principales técnicas de monitorización y control empleadas en los procesos de aporte de material por láser. Debido a las altas temperaturas alcanzadas en las piezas y a los altos gradientes térmicos generados, las tecnologías de monitorización suelen ser sin contacto. Las emisiones que se captan comúnmente son la radiación reflejada del láser de proceso, el plasma o vapor de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

metal generado y la radiación infrarroja del material. Aunque hay trabajos que analizan las emisiones acústicas del proceso, como el sensor testeado por Wang et al. para la detección de grietas [84], la mayoría de los autores adquieren las emisiones ópticas del proceso. Algunas de las clasificaciones en las que se pueden dividir las medidas de emisiones ópticas son según el rango de medida dentro del espectro de la luz reflejada o emitida por la pieza (visible o infrarroja) o en medidas espacialmente discretas (cámaras CCD y CMOS), espacialmente integradas (fotodiodos) o espectralmente discretas (espectrómetros).

Por otro lado, también existe un gran interés en obtener una medida de la geometría de la pieza, de cara a detectar desviaciones de la pieza respecto de la geometría de partida y poder realizar correcciones durante el proceso [85].

En los siguientes subapartados se presentan las técnicas de monitorización analizadas en el estado del arte incluyendo la monitorización y control por medio de cámaras de visión, digitalizado tridimensional mediante escáneres de medida y finalmente otros métodos alternativos susceptibles de ser empleados para la medición de la altura de la pieza fabricada. Para facilitar el seguimiento del apartado, en la Tabla 2 se resumen los trabajos científicos analizados en este estado del arte sobre la monitorización y control del proceso LMD.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Tipo de monitorización y control	Equipo / principio de medida	Colocación	Parámetro controlado	Referencias
Térmico	Cámara de visión	Coaxial	Potencia láser	[86–92]
			-	[93, 94]
	Cámara NIR	Coaxial	Potencia láser	[95, 96]
		Lateral	-	[97]
	Cámara MWIR	Coaxial	-	[93]
		Lateral	-	[97–101]
	Cámara LWIR	Lateral	-	[102]
	Pirómetro	Lateral	Potencia láser	[103]
			-	[86, 87, 98, 100–102]
	Altura de pieza	Cámara de visión	Lateral	Potencia láser
Velocidad de avance				[92, 105]
-				[106]
Cámara de visión y proyección láser		Lateral	-	[107, 108]
			Tasa de aporte	[91]
		Coaxial		[109]
Sistema de medida comercial de triangularización		Montaje en cabezal	Tasa de aporte	[7, 110]
Escáner de proyección de patrones		Montaje en cabezal	Compensación de posición del cabezal	[111]
Métodos alternativos		Montaje en cabezal	Tasa de aporte	[112, 113]
		Coaxial	-	[114]
Geometría de pieza completa / distorsiones	Escáner tridimensional	Externa	Geometría	[115, 116]

Tabla 2. Resumen de los trabajos científicos sobre la monitorización y control del proceso LMD.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

2.6.1. Monitorización y control térmico del proceso LMD

La temperatura alcanzada en la pieza es el aspecto crítico para la consecución de la fabricación de una pieza con unas cualidades adecuadas, ya que determina si el material está siendo fundido correctamente, el grado de dilución que el baño tendrá en el sustrato o la tasa de enfriamiento del material y la microestructura resultante. Por este motivo, se han llevado a cabo diferentes estudios para tratar de monitorizar la temperatura del baño fundido en el proceso LMD.

Muchos de los cabezales comerciales para LMD incorporan puertos ópticos que permiten realizar una monitorización coaxial al láser. La colocación de cámaras coaxiales en el cabezal permite obtener una visión adecuada de la zona procesada, por lo que suele ser el método más empleado para realizar un control en lazo cerrado de la temperatura alcanzada en el baño fundido independiente de la dirección de aporte. En el caso de emplear cámaras de visión, los valores obtenidos son de luminosidad y no de temperatura, por lo que suele ser necesario un procesamiento de las imágenes capturadas para determinar un parámetro que tenga cierta correspondencia con la temperatura alcanzada en la pieza. En la Figura 23 se muestra la imagen del baño fundido tomada por una cámara coaxial. Las imágenes obtenidas por una cámara asignan a cada píxel un valor representado por un número determinado de bits. En el caso del formato Mono8, el valor del píxel está representado por 8 bits lo que da lugar a 256 valores posibles, donde 0 corresponde con el negro y 255 con el blanco. Posteriormente, suele realizarse una operación de binarización en la que los píxeles son considerados únicamente blancos o negros, a partir de un valor de píxel umbral establecido por el usuario. Finalmente, teniendo en cuenta la dirección de movimiento, es posible obtener un valor del ancho del baño fundido que, cómo quedará reflejado en los trabajos introducidos en este apartado, está directamente relacionado con la temperatura de este. Por otro lado, el ancho del baño no es el único parámetro que puede emplearse para relacionarlo con su temperatura. Otros parámetros empleados son el área, la intensidad media dentro del baño, su longitud o las dimensiones de los ejes de una elipse ajustada al contorno del baño.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

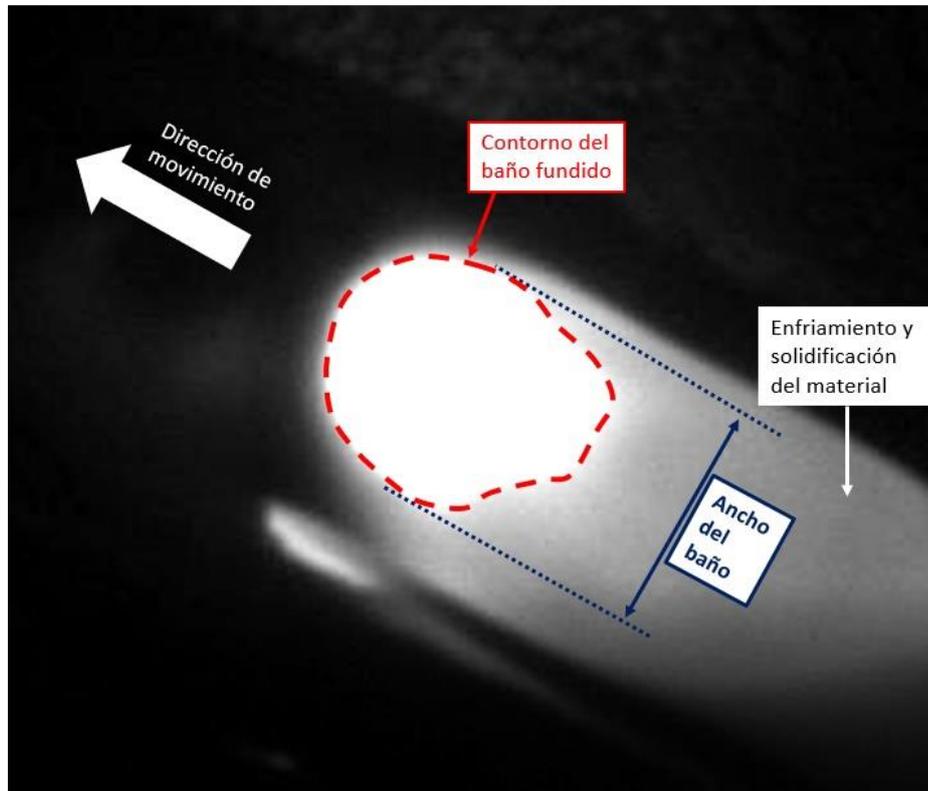


Figura 23. Imagen coaxial del baño fundido y determinación del ancho del baño, directamente relacionado con su temperatura.

Por otro lado, además de las cámaras que captan la radiación visible, es posible emplear cámaras sensibles a la radiación infrarroja. Éstas permiten, además de medir con exactitud las dimensiones del baño, conocer la distribución térmica en el baño fundido.

Una vez determinado el parámetro que indirecta o directamente mide la temperatura del proceso, esta señal puede ser empleada para realizar un control de lazo cerrado en el proceso. El parámetro más empleado para realizar el control térmico es la potencia del láser, aunque también existen trabajos en los que se ha empleado la velocidad de avance, la tasa de aporte o una combinación de varios parámetros.

En este apartado se describen algunos de los principales trabajos relacionados con la monitorización, tanto con cámaras de visión como con cámaras infrarrojas, junto con las soluciones de control empleadas en cada caso.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

2.6.1.1. Monitorización y control térmico mediante cámaras de visión

En [86] y [87] Bi et al. incorporaron una cámara CCD en el puerto óptico del cabezal (Figura 24). Esta configuración de cabezal cuenta con un espejo dichroico transparente a la longitud de onda del láser (1064 nm) que refleja la radiación visible. De esta forma, es posible monitorizar las emisiones del proceso por el mismo camino óptico que el láser del proceso (medida on-axis). También se empleó un fotodiodo incorporado en el cabezal sensible en el rango infrarrojo y un pirómetro colocado con cierto ángulo respecto al láser (off-axis). Mediante la comparación de los tres métodos de monitorización de las emisiones, se llegó a la conclusión de que el fotodiodo colocado dentro del cabezal ofrece una medida similar al pirómetro, además de que muestra menos dependencia de la dirección de aporte.

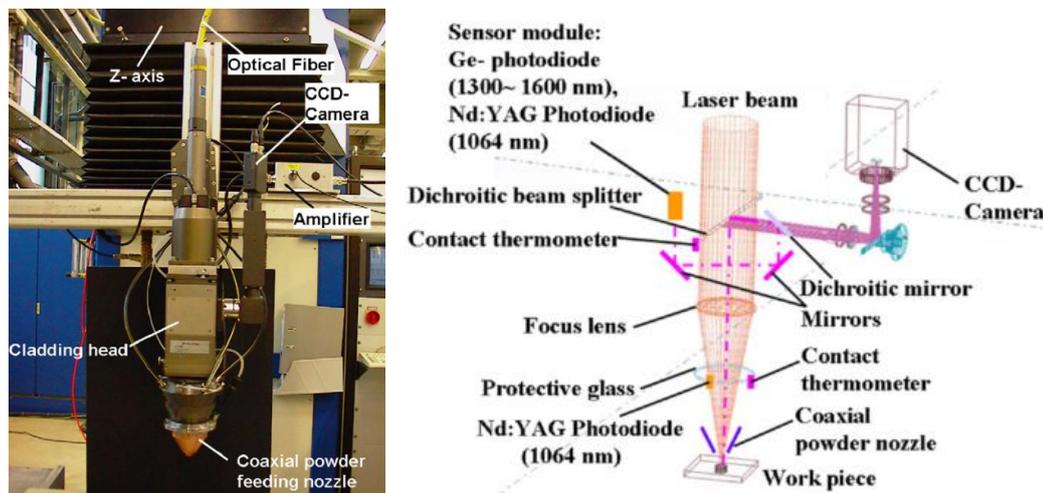


Figura 24. Configuración del cabezal de aporte empleado en [87] mostrando la monitorización por medio de una cámara CCD colocada en el puerto óptico del cabezal.

Hofman et al [88, 89] emplearon un sistema similar de monitorización con una cámara coaxial. En este caso, se especificó el tratamiento de imágenes aplicado sobre el baño fundido. Se empleó una cámara de visión monocromática, por lo que la imagen de partida adquirida fue en escala de grises. Esta imagen puede contener píxeles iluminados que no corresponden al baño fundido como por ejemplo partículas de polvo o material que sale del baño fundido del proceso. Por este motivo, el primer paso necesario fue aplicar un filtro que eliminó estos píxeles indeseados. Por otro lado, se aplicó una operación de binarización para convertir la imagen de escala de grises a una imagen en blanco y negro. Este paso permitió posteriormente la medida de las dimensiones del baño fundido. Finalmente, los

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

autores ajustaron la imagen a una elipse para extraer las dimensiones del baño fundido en la dirección del movimiento y en la dirección transversal. En este caso se empleó la señal del ancho de baño para variar la potencia del láser en función de su valor, y así mantener el aporte térmicamente estable. La medida del ancho del baño fundido permite realizar un control térmico in-situ, ya que existe una correlación entre el tamaño del baño y su temperatura. Algunos de los inconvenientes de este método de monitorización son la dificultad de encontrar los parámetros de filtrado o binarización de la imagen para diferentes parámetros de proceso o materiales de aporte, así como eliminar la influencia de las desviaciones de altura en el cambio de tamaño del baño fundido.

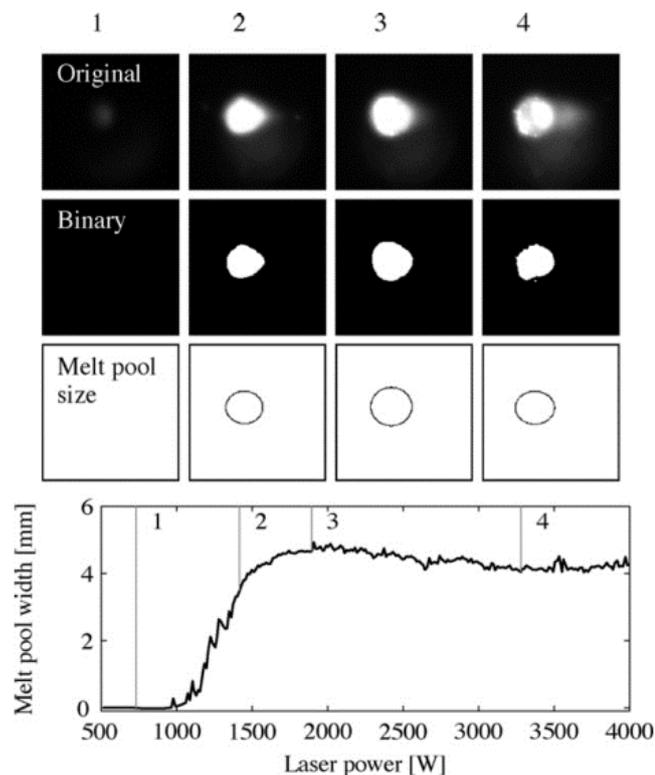


Figura 25. Monitorización del baño de forma coaxial y procesado de imagen para obtener el ancho del cordón [89].

Otro inconveniente de realizar un control in-situ basado en la monitorización con una cámara es la baja frecuencia de control alcanzable, debido a la necesidad de procesar cada imagen adquirida para extraer el valor del ancho del baño. Una solución para mejorar este aspecto es el propuesto por Colodron et al. [94], en el que sustituyeron las operaciones de procesado de la imagen en un PC por un FPGA.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Se demostró que para condiciones de captura similares es posible sustituir una frecuencia de control de 3,3 fps en el caso del PC por 110 fps en el caso del FPGA.

En [90], Ocylok et al., aplicaron estos conceptos para realizar un control sobre una geometría tipo pared de un único cordón de ancho con una cámara de visión CMOS. En primer lugar, se realizó una experimentación para determinar el efecto que tienen sobre la anchura del baño los parámetros del proceso como la potencia laser, energía proporcionada por unidad de longitud, caudal de aporte de polvo o temperatura del substrato. Finalmente, con la información obtenida de la experimentación, fabricaron una pared variando la potencia y otra pared con potencia constante. En el caso en el que se aplicó un ajuste de la potencia el ancho del baño se mantuvo prácticamente constante durante el aporte.

2.6.1.2. Monitorización y control térmico mediante cámaras infrarrojas

Mientras que en los casos anteriores la cámara colocada coaxialmente detectó las emisiones en el rango visible de la luz, una alternativa es realizar esta medida en el rango infrarrojo (Figura 26). Mediante el uso de la cámara y filtros apropiados es posible realizar una monitorización en las longitudes de onda infrarrojas deseadas. Un aspecto que se debe tener en cuenta a la hora de determinar el sistema de monitorización del baño fundido es el camino óptico que deberá seguir la luz emitida por el proceso, ya que podría contener componentes ópticos intermedios que filtren las emisiones en el rango de medida deseado. Además, es importante asegurar que la longitud de onda del láser del proceso queda filtrada para evitar que el sensor capture la emisión del propio láser y evitar además que el sensor de la cámara se dañe.

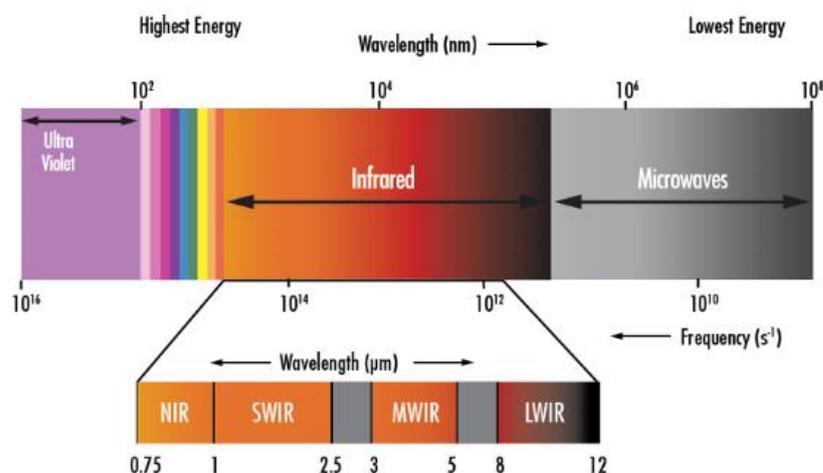


Figura 26. Espectro de luz y denominación de rangos dentro del rango infrarrojo [117].

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Un ejemplo de aplicación de medida mediante cámara infrarroja en el rango infrarrojo cercano o Near Infrared Radiation (NIR) es el desarrollado por Hu et al. en [95, 96]. Las medidas fueron realizadas de forma coaxial en el rango del espectral comprendido entre $0,7 \mu\text{m}$ y $1,06 \mu\text{m}$. Según describieron los autores, el hecho de realizar la monitorización en este rango espectral permitió definir mejor la forma del baño, además de eliminar el ruido a causa del polvo metálico no fundido, que siempre está presente en el proceso LMD-P.

Rodriguez-Araújo et al. [93] realizaron la comparación entre una cámara CMOS operando en el rango visible y un sensor que captó las emisiones en el rango denominado infrarrojo de longitud de onda media o Mid Wavelength Infrared Radiation (MWIR), ambas en el puerto óptico del cabezal. Los resultados confirmaron la dificultad de detectar temperaturas menores a $900 \text{ }^\circ\text{C}$ en el rango visible y, por tanto, las imágenes alcanzaron la saturación rápidamente dando lugar a un estrecho rango dinámico. Por el contrario, los sensores que captaron la imagen en el rango MWIR fueron capaces de adquirir una distribución de temperaturas más amplia durante el proceso (Figura 27). Mientras que el mayor rango dinámico de las cámaras en el rango IR es una clara ventaja sobre las cámaras visibles hay que tener en cuenta una resolución generalmente inferior a las cámaras visibles, la necesidad de adaptar los elementos ópticos del cabezal de aporte para realizar una medida coaxial y un mayor coste del equipo.

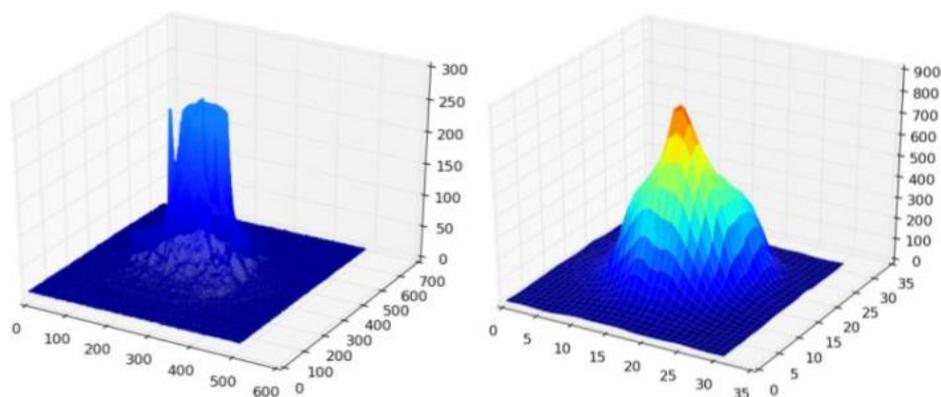


Figura 27. Comparativa de los niveles digitales en la monitorización del baño fundido de forma coaxial entre una cámara CMOS en el rango visible y un sensor PbSe no refrigerado operando en el rango MWIR. Se comprueba el mayor rango dinámico de la cámara MWIR al mismo tiempo que una resolución limitada [93].

En muchos casos es común que los elementos ópticos que componen el cabezal de aporte (espejos, espejos dicróicos, ventanas de protección, lentes) filtren las

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

longitudes de onda en el rango infrarrojo en el que mide la cámara. En el caso de los componentes ópticos dispuestos en el puerto óptico de monitorización, esto puede ser debido a que se realiza un filtrado para evitar la exposición del sensor de la cámara a las reflexiones del láser del proceso. Aunque podrían emplearse elementos que únicamente filtren la longitud de onda del láser del proceso, lo más común por su menor coste suele ser el empleo de un filtro pasabanda que únicamente transmita las longitudes de onda visibles. La posible necesidad de modificar algunos componentes ópticos del cabezal es un aspecto que debe ser considerado a la hora de definir el rango de medida del sistema de monitorización on-axis.

En los casos en los que no es posible realizar una medida on-axis en el rango deseado, la alternativa consiste en incorporar una cámara infrarroja off-axis como la introducida por el grupo de investigación compuesto por Smurov, Doubenskaia et al. [98–101]. El rango de medida de esta cámara fue el MWIR comprendido entre 3 μm y 5 μm . La medida del baño con una cámara infrarroja en estas condiciones aportó un mayor conocimiento sobre el fenómeno de enfriamiento de la pieza y la influencia de los parámetros de proceso sobre la distribución de temperatura en el baño fundido. Por otro lado, al tratarse de una medida dependiente de la dirección de aporte aumenta la dificultad de su integración en un control basado en esta monitorización.

Una disposición similar es la propuesta por Liu et al. [102]. Se incorporó una cámara IR y un pirómetro, ambos colocados off-axis. El rango de medida de la cámara fue el infrarrojo de longitud de onda larga o Large Wavelength Infrared Radiation (LWIR), comprendido entre 7,5 μm y 13 μm . Como puede observarse en la Figura 28, se consiguió capturar la distribución de temperatura del baño fundido con un adecuado rango dinámico y calcular las tasas de enfriamiento para diferentes combinaciones de parámetros.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

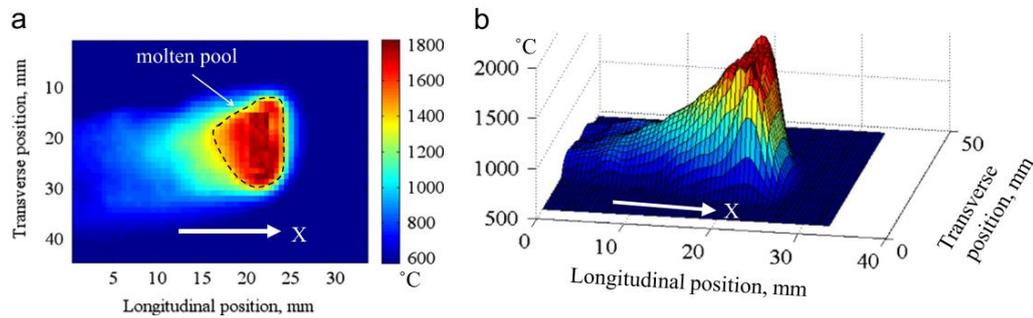


Figura 28. Monitorización del baño off-axis con cámara IR en el rango LWIR. a) Imagen térmica obtenida por la cámara; b) perfil de temperaturas mostrando un adecuado rango dinámico en la distribución de temperaturas del baño.

Otra comparativa entre diferentes rangos de medida dentro del espectro IR fue la realizada por Altenburg et al. [97], en la que se emplearon una cámara MWIR con un rango entre $2 \mu\text{m}$ y $5 \mu\text{m}$ y una cámara visible con un filtro estrecho NIR entre 807 nm y 817 nm . Se obtuvieron dos conclusiones principales. Por un lado, se comprobó el limitado rango dinámico de la cámara visible operando en el rango NIR en comparación con la cámara MWIR. Por otro lado, se observó una mayor tendencia a la aparición de reflexiones provocadas por otras partes de la pieza en el caso de la cámara MWIR. En el caso de la cámara NIR estas reflexiones no se dieron, lo que se justificó por la reducción de la emisividad de las superficies metálicas rugosas con la disminución de la longitud de onda. Como futura investigación, los autores plantearon evaluar la actuación de las cámaras en el rango infrarrojo de longitud de onda cercana o Short Wavelength Infrared Radiation (SWIR) para tratar de combinar las ventajas de ambos rangos.

Así, analizando los trabajos en los que se han empleado cámaras de visión para monitorizar el estado térmico de la pieza durante su fabricación, se ha podido observar que se han llevado a cabo medidas dentro de los diferentes rangos del espectro visible, NIR e IR (SWIR, MWIR, LWIR). Una de las conclusiones extraídas es que el empleo de una cámara NIR o IR elimina en gran medida el ruido debido a las partículas de polvo o de material en general que sale de la zona fundida. Además, el rango dinámico de las cámaras IR es muy superior al de las cámaras que operan en el rango visible o NIR permitiendo tener una mejor distribución de temperaturas en el baño fundido lo que puede facilitar la caracterización de su forma.

Teniendo en cuenta los diferentes rangos de medida dentro del espectro de la luz de las cámaras IR empleadas en la literatura puede surgir la duda del rango adecuado

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

para la monitorización térmica de la pieza. En general, las cámaras SWIR y MWIR suelen contar con sensores (InGasAs, CMT, InSb) que requieren ser refrigerados criogénicamente, lo que aumenta considerablemente la complejidad de su aplicación. Por otro lado, ofrecen una mayor sensibilidad, mayor resolución y frecuencia de adquisición. Además, las temperaturas que suele alcanzar el proceso LMD, superiores en muchos casos a 1500 °C, hacen que la mayor parte de la radiación se produzca en estas franjas del espectro, lo que las hace más adecuadas para la medición de altas temperaturas.

Aunque también existen cámaras en el rango LWIR que cuentan con refrigeración, lo más común es que dispongan de un sensor denominado microbolómetro, el cual al recibir la radiación infrarroja se calienta y cambia su resistencia eléctrica. Este tipo de sensores no requiere de refrigeración, lo que disminuye considerablemente su complejidad, a costa de una menor resolución de imagen y frecuencia de adquisición. Finalmente cabe destacar el amplio rango dinámico con el que cuentan estas cámaras, pudiendo realizar medidas sobre objetos a temperatura ambiente al mismo tiempo que a altas temperaturas. Además, en el caso de querer cuantificar la temperatura a partir de la radiación infrarroja medida por el sensor, es necesario ajustar la emisividad, aspecto que puede ser de gran complejidad en las condiciones reales del proceso LMD.

Otro aspecto tratado en los trabajos consiste en las reflexiones producidas por las emisiones de la propia pieza y que afectan al tratamiento posterior de la imagen. Se ha comprobado como al aumentar las longitudes de onda de la cámara IR aumentan también las reflexiones de la radiación emitida por la propia pieza, lo que puede dificultar el tratamiento de la imagen y supone una desventaja de la monitorización IR frente a la visible o NIR.

Como resumen de este apartado puede concluirse que los aspectos fundamentales a la hora de determinar el sistema de monitorización y control del proceso LMD mediante cámaras de visión son el rango de medida de la cámara, la resolución del sensor, la necesidad de procesado de la imagen, la frecuencia de adquisición alcanzable y el coste del equipo.

2.6.2. Monitorización y control de altura del proceso LMD

Los trabajos descritos hasta el momento han estado enfocados al control térmico de la pieza ya sea mediante la medida del baño fundido con una cámara colocada coaxialmente, mediante pirometría o con cámaras infrarrojas. Sin embargo, otros

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

autores han tratado de realizar un control geométrico de la pieza durante su fabricación.

El objetivo es obtener información de la geometría del cordón aportado, la cual es desconocida a priori y depende de los parámetros de proceso. Así, esta medida sirve para poder analizar el correcto funcionamiento del proceso y modificar las condiciones de proceso del siguiente cordón o capa aportada en función de las dimensiones medidas. El parámetro más analizado en la literatura es el de la altura alcanzada en la pieza durante su crecimiento. Esto es debido a que, para mantener unas condiciones de proceso estables, es fundamental contar con una distancia entre boquilla y cabezal constante, como se explica en el apartado 2.3.

Se han empleado diferentes métodos para medir el crecimiento de la pieza en la literatura. En los siguientes apartados se presentan algunas de estas soluciones, basadas en cámaras de visión, proyección de luz láser, equipos de digitalizado tridimensional comerciales y otros métodos de control de altura alternativos.

2.6.2.1. Monitorización y control de altura mediante cámaras de visión

Con el objetivo de monitorizar el crecimiento del cordón aportado, en la mayoría de los casos, la colocación de las cámaras se ha realizado con cierto ángulo respecto al láser de proceso (off-axis), ofreciendo la posibilidad de medir la altura de la pieza y las desviaciones respecto a la altura de capa teórica.

Toyserkani y Khajepour [104] desarrollaron una solución basada en una cámara CCD colocada a 90 grados respecto del láser, es decir, en posición horizontal. Tras el procesado de las imágenes consiguieron correlacionar la altura del cordón medido por la cámara con el perfil de altura medido tras el aporte. Finalmente aplicaron un control PID sobre paredes finas de un único cordón, actuando sobre la potencia láser. Aunque los resultados fueron satisfactorios se destaca la limitación que habría en esta disposición de cámara y pieza al aplicarlo sobre geometrías más complejas.

Fathi et al. [105], del mismo grupo de investigación, incorporaron un modelo basado en la variación de la altura del cordón en función de la velocidad de aporte. Este modelo fue aplicado mediante un control feedforward para determinar la velocidad necesaria para alcanzar la altura de cordón deseada. Debido a la dificultad de modelizar el proceso de aporte con exactitud se empleó adicionalmente un control de lazo cerrado en feedback. Para demostrar la efectividad del modelo y

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

control desarrollados se realizaron paredes simples en las que se varió la altura de capa deseada a lo largo del cordón. El control actuó correctamente adaptando la velocidad a la altura predefinida. La combinación de un modelo feedforward junto con un control feedback mostró la capacidad de mejorar el control de altura respecto de un control puramente feedback. Por otro lado, aunque en este caso se generó un modelo capaz de adaptar la velocidad a una altura de cordón deseada, no se realizó un análisis sobre la posible mejora de la estabilidad del proceso o la dificultad de generar el modelo del proceso ante diferentes condiciones de fabricación.

En un intento por reducir la dependencia de este sistema ante los cambios de dirección, Iravani-Tabrizipour junto a Toyserkani presentó en [106] una solución basada en la incorporación de tres cámaras CCD alrededor del cabezal de aporte (Figura 29). Gracias a este sistema, la altura de aporte fue calculada alternando entre las tres cámaras en función de la dirección de aporte.

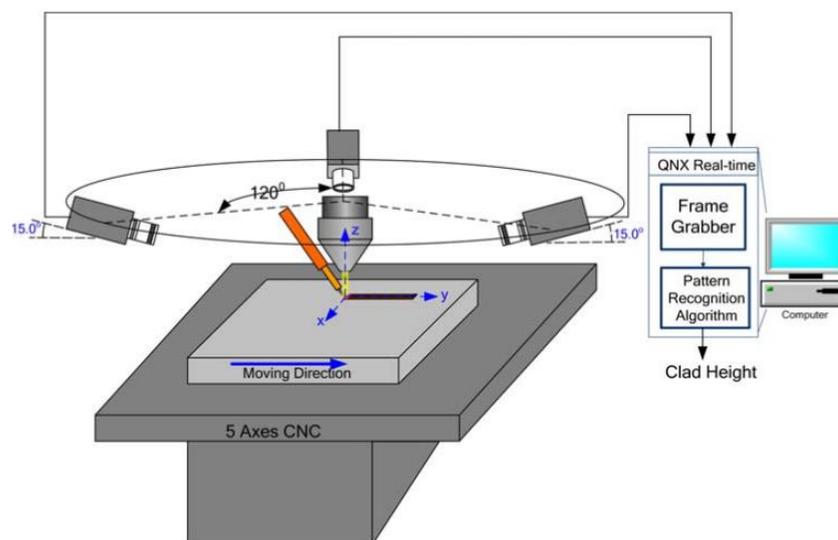


Figura 29. Control de altura basado en un sistema de monitorización con tres cámaras off-axis alrededor del cabezal del aporte [106].

Un sistema similar fue empleado por Song et al. [103], en el que colocaron tres cámaras alrededor del cabezal de aporte, al mismo tiempo que un pirómetro de dos colores. El sistema conformado por las tres cámaras fue empleado para controlar la altura de aporte mientras que el pirómetro fue usado para el control térmico del proceso. La particularidad de este sistema residió en que ambos controles actuaron sobre la potencia láser dando lugar a un control con dos entradas y una única salida. Aunque el control priorizo la señal de altura de cordón y se consiguieron buenos

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

resultados respecto de una pieza generada sin control, la gran desventaja de esta solución es la complejidad que introduce al tener que determinar la actuación del control térmico y geométrico con un solo parámetro, la potencia láser.

2.6.2.2. Monitorización y control de altura mediante cámaras de visión y proyección de luz láser

En los trabajos presentados previamente se han empleado las emisiones del proceso para determinar el ancho o el alto del cordón aportado. Sin embargo, algunos autores han tratado de incorporar una fuente de luz externa para contrarrestar las emisiones del proceso y tener una medida más fiable de las dimensiones del baño fundido. Este es el caso de Seltzer et al. [107], que introdujeron iluminación laser alrededor de una longitud de onda de 405 nm. El sistema fue capaz de eliminar completamente las emisiones del proceso, aunque el equipamiento de iluminación consistente en un total de cinco láseres alrededor del cabezal pudo suponer una excesiva complejidad y encarecer el sistema de monitorización. Por el contrario, se obtuvo una medida del ancho y alto del baño más precisa que en los casos en los que se emplean las propias emisiones del proceso.

En otros casos, se ha empleado un láser de línea para iluminar la superficie aportada y obtener el perfil de altura de la pieza, como es el caso Davis et al. [108], que emplearon un láser de 300 mW a una longitud de onda de 532 nm. En este caso, la iluminación fue insuficiente para eliminar las emisiones del proceso por lo que la medida se realizó a cierta distancia respecto del baño fundido, como puede verse en la Figura 30. Aunque en este caso se realizaron únicamente medidas in-line el sistema podría aplicarse en un control in-situ (Figura 22).

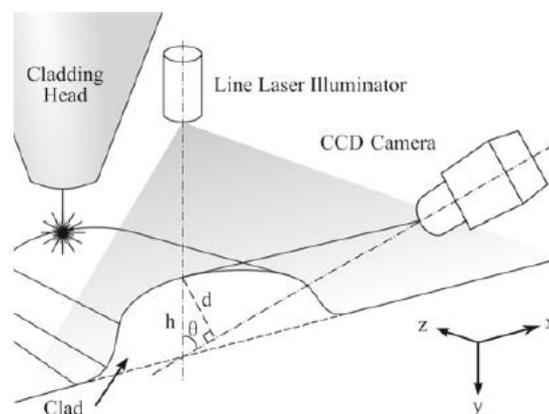


Figura 30. Monitorización de altura de la pieza con proyección de línea láser y cámara CCD off-axis [108].

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Heralic et al. [91] también introdujeron un sistema de proyección de línea láser sobre el cordón aportado (Figura 31). En este caso se dispusieron dos líneas láser una por delante y otra por detrás del baño fundido. De nuevo, las emisiones del proceso limitaron la medida a cierta distancia respecto de la zona de fusión. El proceso de aporte en este caso fue el LMD-W con aporte de hilo lateral, por lo que, como se explica en el apartado 2.3, el control de altura cobró una mayor importancia que en el caso de aporte de polvo. El sistema de control desarrollado fue capaz de corregir un defecto provocado en un cordón, igualando su altura tras la aplicación de la corrección. En este caso, el parámetro empleado para controlar la variación de la altura fue la tasa de aporte de material, mientras que el ancho del baño fundido fue regulado por medio de un control basado en una cámara coaxial.

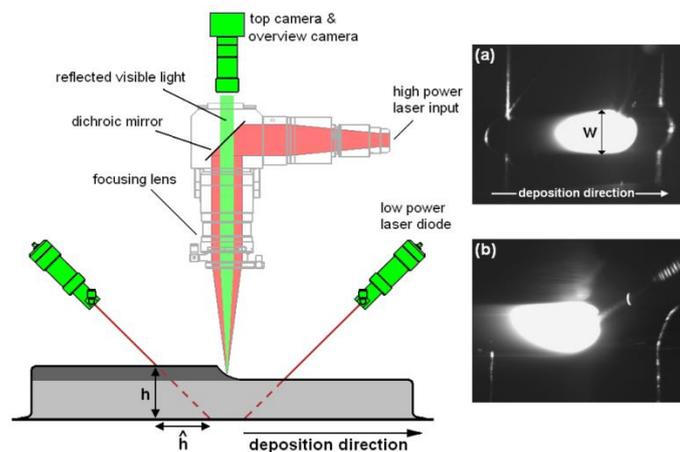


Figura 31. Monitorización de la altura del cordón aportado mediante proyección de línea láser por delante y por detrás del baño fundido y control del ancho del baño con cámara coaxial [91].

Para lograr la automatización del proceso, Heralic et al. presentaron algunas mejoras respecto de este sistema en [92]. El láser empleado para realizar el control fue únicamente el que proyectaba la luz por delante del baño fundido. Sin embargo, la longitud de onda de la línea láser en este caso fue 410 nm en lugar de los 785 nm del sistema inicial, permitiendo reducir la influencia de la radiación térmica emitida por la pieza a alta temperatura. Además, se introdujo una segunda cámara, colocada off-axis, para separar la medida del ancho de baño y la de la altura de aporte (Figura 32). De esta forma, fue posible adaptar el tiempo de exposición de cada cámara para cada una de las medidas. Estos dos aspectos propiciaron un aumento de la precisión de la medida.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

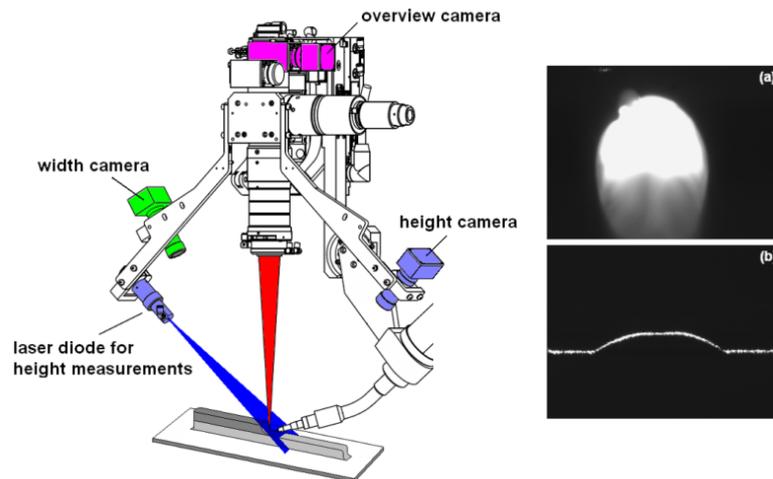


Figura 32. Monitorización de la altura del cordón por delante del baño fundido mediante proyección láser y cámara off-axis y control del ancho de baño con cámara coaxial [92].

2.6.2.3. Monitorización y control de altura mediante digitalizado tridimensional

La gran desventaja de los sistemas compuestos por una cámara de visión y proyección de una línea láser es que difícilmente pueden ser aplicados a geometrías complejas, especialmente si son necesarias trayectorias con cambios de dirección. Es por eso, que Heralic et al. en una tercera solución [8] incorporaron un escáner de línea comercial montado sobre el robot, como se muestra en la Figura 33. Debido a la alta radiación térmica del baño fundido estos equipos actualmente no pueden realizar medidas precisas durante el proceso, por lo que la medida de la altura se realizó entre el aporte de las sucesivas capas. Esto invalida la aplicación de un control fine feedback, donde las correcciones se aplican en tiempo real sobre medidas realizadas in-situ, por lo que las correcciones se realizaron con la variación de altura de cada zona durante las sucesivas capas, dando lugar a un control coarse feedback, en el que se aplican correcciones sobre el proceso con medidas tomadas de manera sincronizada con este. En este caso, la tasa de aporte de hilo metálico fue calculada para cada punto de la capa a aportar en función del perfil de altura aportado en la anterior capa. El error de altura fue separado por un lado en el error medio de la capa, que fue compensado por la corrección de la posición del robot, y en el error respecto de la altura media, lo que se corrigió por medio de la variación de la tasa de aporte. Aunque este control hizo necesaria una parada entre capas y el escáner no es especialmente adecuado para piezas sometidas a alta temperatura, es esperable obtener una mayor precisión de la medida respecto a los sistemas de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

medida in-situ y, además, permitió un control de la altura de aporte independiente de la trayectoria de relleno de pieza empleada.

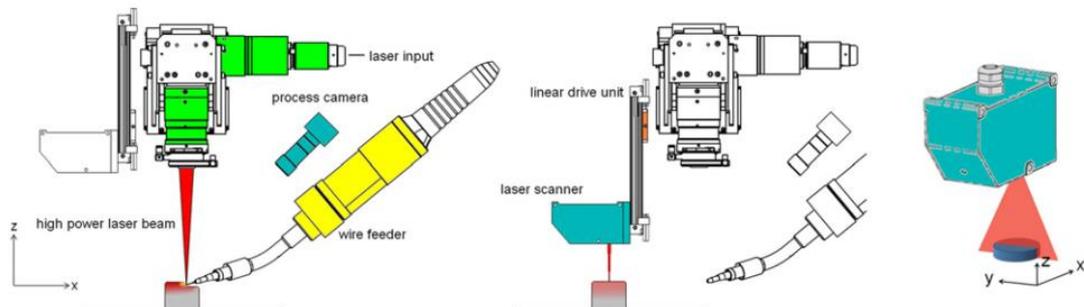


Figura 33. Control de altura entre aporte de capas basado en el escaneo de la superficie por escáner de triangulación láser comercial [8].

Los avances realizados por Almir Heralic et al. en relación con la automatización del proceso de aporte LMD-W basada en el control de la altura de aporte fueron finalmente recogidos en una tesis doctoral [118].

Buhr et al. también incorporaron un escáner de medida comercial fijado en el cabezal [111]. En este caso se trató de un escáner de luz estructurada. En este trabajo se estudió la influencia de la radiación térmica de la pieza sobre la precisión del equipo. De nuevo la longitud de onda del láser de medida, 650 nm, no fue la apropiada para realizar un escaneo preciso por la radiación infrarroja emitida por la pieza. Por este motivo, los escaneos tuvieron que ser realizados entre el aporte de distintas capas y tras un periodo de espera, para que la pieza disminuyese su temperatura.

De manera similar, Tang et al. [110] introdujeron una medida basada en triangulación láser, en este caso de un único punto. Durante el aporte se monitorizó la altura del cordón aportado, así como la temperatura del baño fundido con un pirómetro. Estas dos entradas fueron introducidas en un modelo para predecir los parámetros de proceso necesarios para generar las siguientes capas a aportar. Aunque no se menciona en el trabajo, se intuye que la medida de la altura del cordón se realizó durante el aporte. Para evitar la influencia de las emisiones térmicas del proceso tuvo que ser necesario colocar el punto de medida a cierta distancia del baño fundido. Esto introduce una complejidad extra a la hora de escanear la superficie completa de la pieza y relacionar el punto de medida de altura con el de aporte. Por este motivo, de nuevo, este control sólo podría ser aplicado a geometrías sencillas como paredes de un único cordón.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Otro ejemplo de sistema de triangulación láser es el desarrollado por Donadello et al en [109]. En este caso se proyectó un láser emitiendo a 532 nm a través del camino óptico del láser de proceso, con un pequeño ángulo respecto a él (Figura 34). La proyección del puntero láser sobre la pieza se capturó con una cámara de visión colocada en el puerto óptico del cabezal. En función del desplazamiento horizontal del spot láser se calculó la desviación de altura de la pieza, dando lugar a una medida omnidireccional de la altura de la pieza. La monitorización de la altura se empleó en el proceso LMD-P donde se capturó la desviación de altura en el crecimiento de un cilindro de pared delgada. Según el autor, el polvo o el plasma inducido en el proceso tuvieron un efecto despreciable sobre la precisión del sistema de medida. Para evitar la influencia de la radiación infrarroja del proceso se empleó un filtro estrecho a la longitud de onda del láser de medida, en este caso 532 nm.

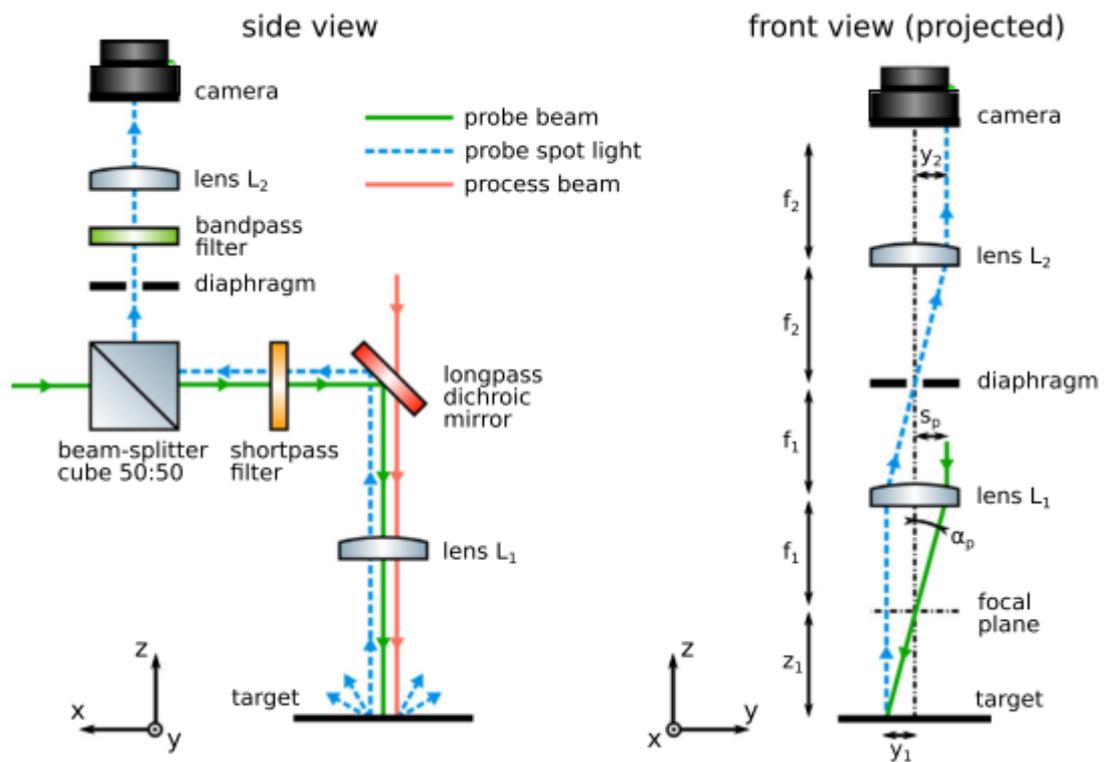


Figura 34. Medida de la altura de la pieza mediante triangulación láser a través del camino óptico del láser [109].

Un aspecto que no queda del todo definido en este trabajo es la sensibilidad del sistema de medida ante una desviación de altura en la pieza. Debido al reducido ángulo del láser de medida respecto al eje del cabezal, el desplazamiento de la

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

proyección del láser sobre la superficie podría ser pequeña en comparación con la desviación en altura. A esto habría que sumarle la limitación de resolución impuesta por la propia cámara de visión empleada.

2.6.2.4. Métodos alternativos de monitorización y control de altura de la pieza

Como se ha visto en los anteriores apartados, los métodos más comunes para controlar la altura de la pieza in-process son mediante la incorporación de cámaras de visión o de equipos de triangularización. Sin embargo, ambos sistemas tienen limitaciones a la hora de generar una medida precisa, omnidireccional y capaz de controlar el proceso in-situ. Actualmente, existe un gran interés en obtener un principio de medida capaz de aunar estas tres características a un coste razonable sin añadir una gran complejidad al sistema.

Dentro de estos desarrollos está el realizado por Haqvist et al. [112], en el que se realiza un control de altura basado en la resistencia eléctrica. El principio de funcionamiento consistió en instalar un circuito eléctrico en el que la corriente fue conducida través del hilo metálico, pasando por el baño fundido y volviendo a la boquilla de aporte de hilo. En un primer trabajo, se realizaron medidas independientes de potencia e intensidad en el circuito para determinar el valor de la resistencia eléctrica. Según se describe en este trabajo, el valor de esta resistencia varió en función de la distancia entre boquilla y superficie, por el aumento de la cantidad de material metálico y de la resistencia del baño fundido, que se ve afectada por su geometría y por el modo de transferencia del material. En este caso el término modo de transferencia del material fue empleado para definir la manera en la que el material es insertado en el baño fundido. En la Figura 35 se muestran los diferentes modos de transferencia entre los que se encuentran el modo de transferencia óptimo, en el que el material es fundido de manera continua y adecuada, el de roce, que puede dar lugar a un enganche del hilo metálico, y el modo de transferencia débil, que puede generar goteo del material fundido. Debido a la dificultad de obtener unos valores nominales con los que comparar las medidas para generar la señal de salida del control, se realizaron unas pruebas previas para determinar los valores adecuados de forma empírica. En un segundo trabajo, se realizaron mejoras sobre el sistema de medida para obtener el valor de la resistencia eléctrica únicamente mediante la medida del voltaje en el circuito, simplificando de esta forma la medición [113]. Finalmente, Haqvist recogió estos desarrollos en una tesis doctoral [119]. Mientras que este sistema resulta en una solución sencilla, barata y sin gran necesidad de mantenimiento, cuenta con la dificultad de obtener

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

unos valores nominales de resistencia eléctrica y la variación de estos en función del material o geometría de pieza.

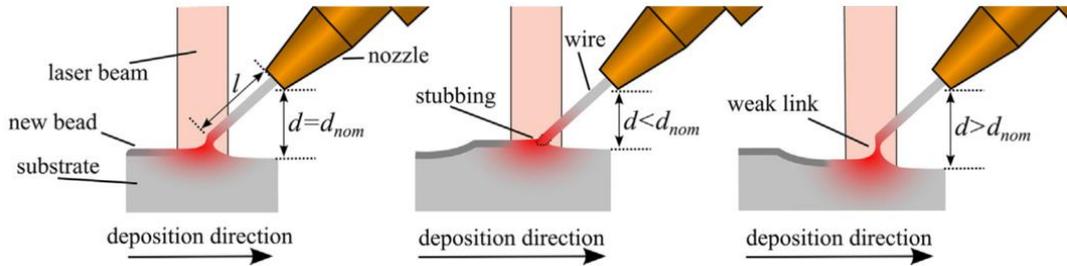


Figura 35. Modos de transferencia de material descritos en [112] en función de la distancia entre boquilla y sustrato. De izquierda a derecha: modo de transferencia óptimo, modo de transferencia de roce, donde existe riesgo de enganche del hilo, y modo de transferencia débil, con posibilidad de goteo del material fundido.

Stavroulakis y Leach presentaron en [120] una recopilación de las técnicas de digitalización 3D aplicables a piezas fabricadas mediante fabricación aditiva. Además de ofrecer una descripción de los métodos más empleados actualmente, divididos en métodos de triangulación y de luz estructurada, también se realizó un análisis de tecnologías de medición candidatas a ser empleadas por la industria de la fabricación aditiva en un futuro, enumerando las principales en la Tabla 3.

TABLE V. Comparison of possible future candidate 3D scanning techniques.

Technique	Best dimensional resolution reported in height axis	Measurement range	Type of view	Works on optically rough surface
Active focus detection through shear interferometry ⁷⁷	10 μm (on optically smooth surfaces) resolution reduced for rough surfaces	300 mm	Point-to-point	Yes
Time of flight ⁹⁶	15 μm	500 mm	Full field	Yes
Close-range photogrammetry ¹⁰⁰	$\sim 15 \mu\text{m}$	30 mm-100 m ^a	Full field	Yes
Volume holographic profilometry ⁹⁵	$\sim 20 \mu\text{m}$ -2 mm	20 cm-2 m	Full field	Yes
Holographic profilometry ⁸⁴	10 μm	50 mm-300 mm depending on object reflectance	Full field	Yes
Moiré profilometry ¹⁰²	Typically $\sim 25 \mu\text{m}$ depends on grating frequency used	N/A	Full field	Yes

^aUsed definition of close range photogrammetry in the paper and size of object in the study to obtain estimates for range values because the distance between the camera and the object was not defined in the paper. The most likely distance from photographs shown is estimated to be 40 cm-50 cm.

Tabla 3. Técnicas alternativas candidatas para ser empleadas en el futuro para la medición de la geometría de la pieza generada por FA [120].

Un ejemplo es el presentado por el Fraunhofer ILT en [114], consistente en un sistema de medida interferométrico. A través del camino óptico del cabezal de aporte un láser de medida incide sobre la superficie alrededor del láser de proceso (Figura 36). Esta prometedora solución podría ofrecer una medida omnidireccional y precisa. Entre sus desventajas se encuentra el aumento de la complejidad del

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

sistema óptico del cabezal, al tener que direccionar el láser de medida alrededor del baño, o la necesidad de sincronizar el control con la dirección de aporte. Igualmente, será necesario evaluar la profundidad de medida en altura del sistema, ya que estas técnicas son típicamente empleadas en aplicaciones de mayor precisión como microscopía, en la que el rango de medida suele ser más pequeño, estando generalmente enfocado a la caracterización de la superficie. Por otro lado, también será necesario probar su aplicabilidad a aportes de diferentes grados de complejidad geométrica.

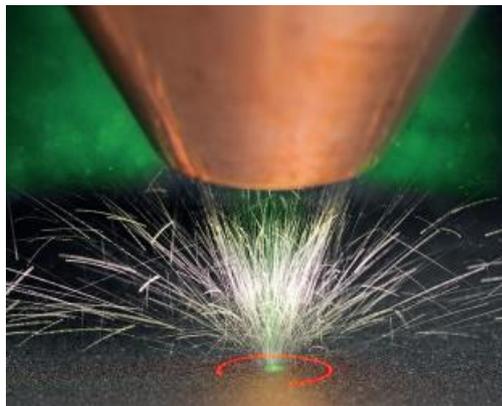


Figura 36. Sistema de medida alrededor del láser de proceso basado en interferometría láser desarrollado por Fraunhofer ILT [114].

2.6.3. Digitalizado tridimensional de la geometría fabricada

En la mayoría de los casos, los equipos de digitalización de la pieza fabricada han estado enfocados únicamente en el control de la altura alcanzada en la pieza durante su fabricación, para así poder realizar correcciones sobre el proceso que eviten un fallo de este. Sin embargo, la incorporación de equipos basados en el digitalizado de la geometría abre además la posibilidad de controlar la evolución de la geometría aportada durante la fabricación. Algunos de los principales métodos de medida ópticos y sus principios fueron recopilados por Pears et al. en [121]. Estos métodos han sido empleados por diferentes autores, en general mediante equipos de medida comerciales, para realizar medidas de la geometría en proceso o inmediatamente después de este.

En algunos estudios se ha examinado la distorsión de las piezas debida a las tensiones residuales. En [115] Möller y Emmelmann realizaron un estudio de las desviaciones de la pieza fabricada respecto del CAD original relacionándolas con las tensiones residuales resultado del proceso. Turichin et al. [116] emplearon un procedimiento similar en la fabricación de un cilindro de gran tamaño, analizando

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

de nuevo las distorsiones debidas a las tensiones residuales. En estos casos, las distorsiones fueron medidas después de concluir el proceso, una vez enfriada la pieza. Sin embargo, es posible que, en determinadas condiciones, las desviaciones geométricas sean tales que se dé un fallo del proceso, por lo que sería necesario realizar una medida durante el proceso.

Un factor que debe ser tenido en cuenta a la hora de optar por sistemas de medida basados en triangulación es la complejidad de realizar una medida suficientemente precisa de las piezas en proceso en determinadas condiciones. En primer lugar, está la limitación de los equipos de medida comerciales para realizar una digitalización sobre piezas que están a una temperatura elevada [122]. Por otro lado, en el caso de que la medida se haga entre diferentes etapas del proceso, la pieza puede estar en una etapa de enfriamiento, con la correspondiente contracción de la pieza. Finalmente, las condiciones de medida en la máquina de fabricación aditiva difícilmente pueden ser controladas, por lo que los errores térmicos del propio sistema de medida pueden cobrar importancia, a menos que se introduzca una etapa de recalibración del sistema de medida previa a la medición. Además, algunas superficies metálicas pueden ser excesivamente reflexivas, lo que puede aumentar el ruido de las medidas o incluso imposibilitarlas.

Al realizar una medida con un equipo de digitalización se están asumiendo una serie de errores que pueden afectar en gran medida a la precisión de la medida. En este punto cabe destacar que las piezas fabricadas por la tecnología LMD raramente cuentan con las tolerancias necesarias para la aplicación final [123], por lo que en la mayoría de los casos requieren de una operación de mecanizado posterior que otorgue el acabado final requerido en la pieza. Es importante tener en cuenta este aspecto, ya que permite compensar los errores de precisión de la medida de las piezas, o las desviaciones inducidas por el proceso, con un aumento de las creces de material dadas a la pieza al ser fabricada por LMD.

Sin embargo, el digitalizado de la geometría podría ser de utilidad a la hora de establecer las referencias en la pieza para el mecanizado posterior o para determinar la cantidad de material a eliminar, reduciendo así el tiempo de proceso.

2.7. Sistemas de monitorización y control industriales

Algunas soluciones de monitorización y control han sido comercializadas para su integración en sistemas de fabricación basados en el proceso LMD. Por otro lado, algunos de los fabricantes de máquinas dedicadas a la FA mediante métodos DED

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APOORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

incorporan opciones y softwares propios para la monitorización y control del proceso. Algunos ejemplos de este tipo de soluciones son presentados a continuación.

2.7.1. Sistemas de monitorización y control integrables en sistemas de fabricación existentes

El sistema de monitorización CLAMIR consiste en la colaboración entre la empresa New Infrared Technologies [124], proveedor de cámaras infrarrojas, y el centro tecnológico AIMEN [9]. CLAMIR es un sistema de control de proceso LMD que mide y mantiene la geometría del baño fundido mediante control en lazo cerrado de la potencia del láser y usando una cámara infrarroja MWIR de alta velocidad (1000 imágenes por segundo). En la Figura 37 se presenta un esquema del lazo cerrado de control utilizado para controlar la potencia en función del tamaño del baño fundido medido mediante la cámara dispuesta de forma coaxial.

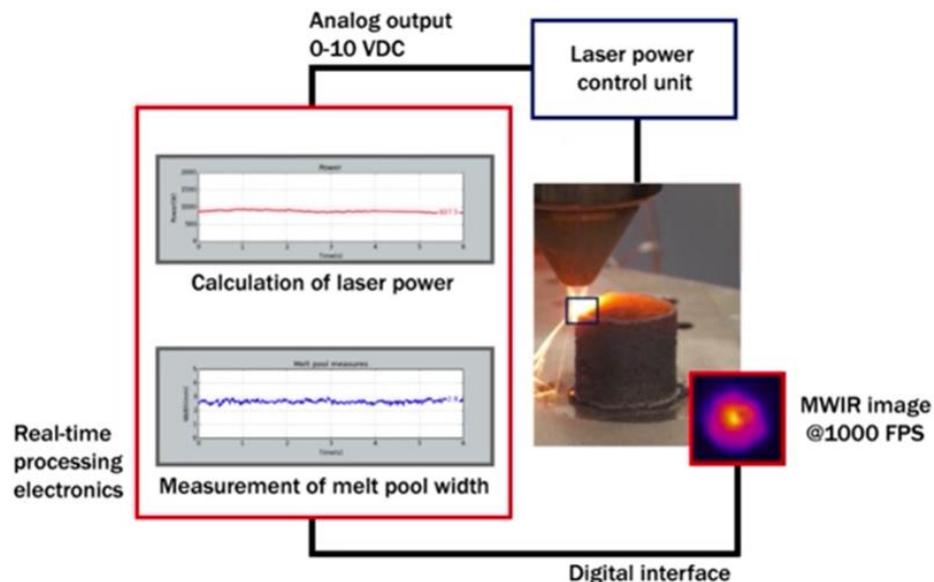


Figura 37. Control de lazo cerrado empleado por el sistema de monitorización y control CLAMIR desarrollado por la empresa Near Infrared Technologies [124] y el centro tecnológico AIMEN [9].

Una solución similar consiste en el software ThermaViz desarrollado por la empresa Stratonics [125]. En este caso las imágenes del baño fundido son tomadas por medio de un sensor basado en pirometría de dos colores que permite obtener una medida de la temperatura del baño fundido con mayor precisión. De esta forma, es posible obtener, además de las dimensiones del baño fundido, la distribución de la temperatura en él. Por otro lado, en el caso de colocar el sensor en una

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

configuración off-axis, es posible monitorizar la tasa de enfriamiento de la pieza en diferentes puntos de ésta. En la Figura 38 se ilustran imágenes del baño fundido con las diferentes señales monitorizadas.

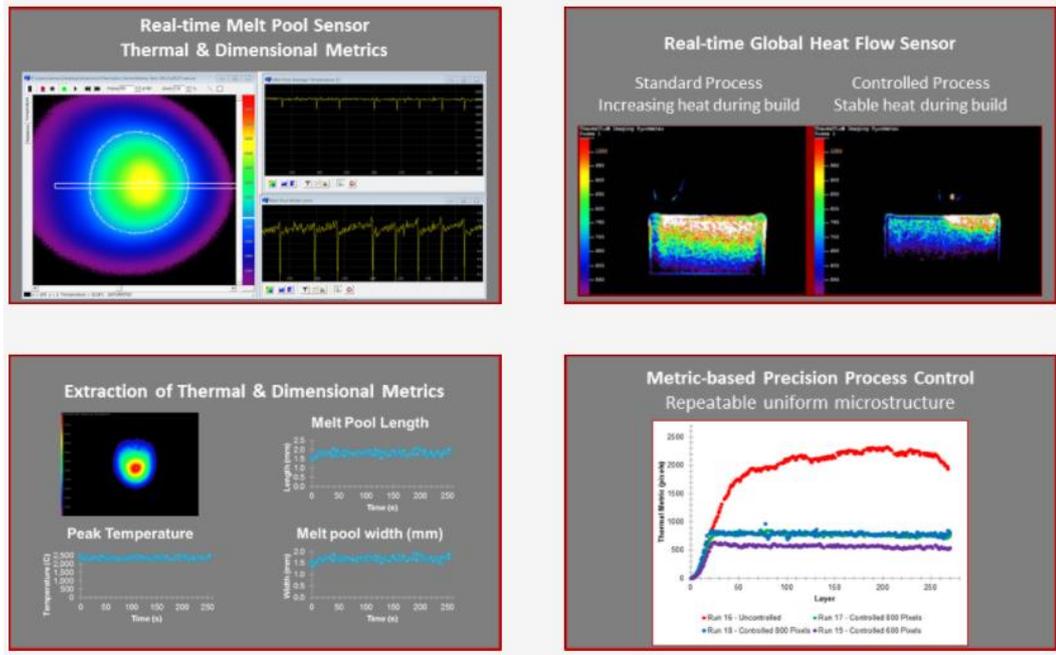


Figura 38. Software de monitorización y control del proceso LMD Thermaviz de la empresa Stratonics [125].

La empresa Precitec [29] comercializa un sensor con un sistema de medida basado en la Tomografía de Coherencia Óptica, en inglés Optical Coherence Tomography (OCT). En la Figura 39a se muestra el sistema OCT integrado en un cabezal láser mientras que la Figura 39b ilustra el principio de medida empleado para determinar la distancia a la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

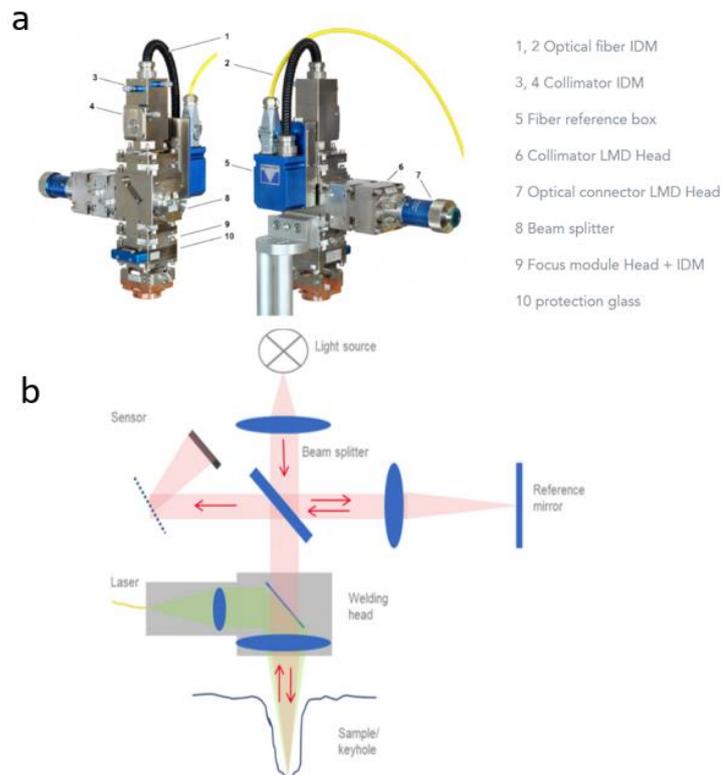


Figura 39. Sensor de medida OCT de la empresa Precitec. a) Sistema OCT integrado en cabezal láser; b) principio de medida OCT y camino óptico del cabezal.

Este sistema fue satisfactoriamente probado en proceso dando lugar una pieza con una precisión geométrica superior, como puede observarse en la Figura 40 [126].

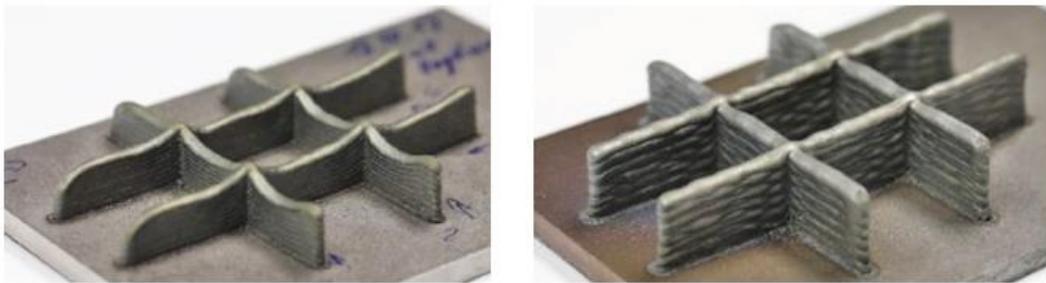


Figura 40. Demostración de la aplicación de un control de altura basado en el sistema de medida OCT desarrollado por la empresa Precitec [126]. Izquierda: pieza fabricada sin control; derecha: pieza fabricada con control.

2.7.2. Sistemas de monitorización y control integrados en máquinas LMD comerciales

Por otro lado, algunos de los principales fabricantes de máquinas de FA mediante el proceso LMD han incorporado sistemas de monitorización y control propios o en colaboración con otras empresas.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Este es, por ejemplo, el caso de la empresa Optomec [53], que incorpora el sistema de monitorización Thermaviz de la empresa Stratonix descrito en el apartado anterior para el dimensionamiento del baño fundido, junto con un control de lazo cerrado de la potencia láser [127] como opción en sus máquinas de LMD-P (Figura 41).



Figura 41. Máquina de LMD-P OPTOMECS LENS CS800 [53].

Otro ejemplo es el de la empresa DM3D Technology [54], que incluye en sus máquinas de LMD, como la de la Figura 42, un sistema de monitorización y control en lazo cerrado de la potencia láser en función de las dimensiones del baño fundido [128] que está patentado.



Figura 42. Máquina de LMD-P DMD 505D de la empresa DM3D Technology [54].

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

La empresa DMG Mori [58] también incorpora un control de lazo cerrado en sus máquinas. En este caso se trata de máquinas híbridas, que combinan el proceso LMD-P con el de mecanizado (Figura 43), excepto para el caso de su máquina con menor tamaño que cuenta con la opción de adquirirla únicamente adecuada al proceso LMD-P. El control de lazo cerrado, al igual que en los anteriores casos, parte del dimensionamiento del baño fundido para controlar la potencia láser y mantener las condiciones térmicas estables. Por otro lado, incorporan una medida de la distancia de trabajo, es decir, la distancia entre la boquilla de aporte y la pieza.



Figura 43. Máquina híbrida de LMD-P con mecanizado Lasertec 65 de la empresa DMG Mori [58].

Finalmente, el fabricante de máquinas LMD-P BeAM [55] presentó en la feria Formnext en Noviembre de 2019, la incorporación del sensor OCT desarrollado por Precitec para el control de la distancia entre boquilla y cabezal en una máquina LMD-P (Figura 44). La integración fue llevada a cabo en colaboración con las empresas Precitec y Siemens.



Figura 44. Máquina LMD-P MAGIC 800 de la empresa BeAM [55].

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En [129] se presenta un demostrador de esta integración mediante la fabricación de una pieza sin control y otra con la aplicación del control de altura basado en la medida del OCT, mostrando una clara mejora en la precisión geométrica (Figura 45).

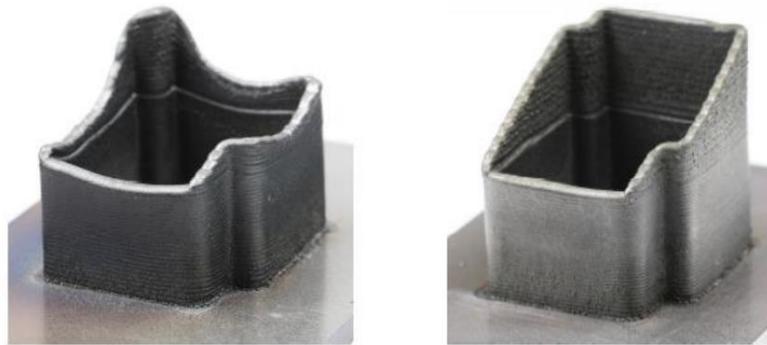


Figura 45. Demostrador de la aplicación del control de altura basado en la medida por medio del sensor OCT de Precitec [129]. Izquierda: pieza fabricada sin control; derecha: pieza fabricada con control de altura.

Mientras que, por su simplicidad y facilidad de configuración, el sistema de monitorización y control más incorporado en máquinas hasta el momento ha sido el control de la potencia láser mediante la integración de una cámara coaxial, es de esperar que los fabricantes de máquinas incorporen sensores con diferentes principios de medida, como es el ejemplo del OCT, cámaras termográficas o sistemas de digitalizado de pieza tridimensional. Esto ofrecerá a las máquinas LMD capacidades superiores en cuanto a calidad y fiabilidad de las piezas fabricadas y un mayor conocimiento del proceso.

2.8. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado una revisión bibliográfica entorno al proceso LMD y en particular enfocada en la monitorización y control de este.

En primer lugar, se han descrito las principales características y parámetros de proceso en el aporte de material por LMD, tanto con aporte de polvo como de hilo metálico. La búsqueda de unos parámetros adecuados de aporte supone en muchos casos un gran trabajo previo a la fabricación de una pieza, y aun así no garantiza que el resultado sea satisfactorio al aplicarlo sobre la geometría final.

La irrupción de nuevos cabezales de aporte de hilo metálico coaxial dificulta esta tarea. Mientras que el hilo cuenta con ventajas evidentes sobre el material en forma de polvo, como un menor coste, una mayor eficiencia y menor riesgo para el

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

operario, también introduce una mayor complejidad en el proceso. Ha quedado evidenciado que uno de los aspectos críticos a la hora de mantener el proceso estable y dar lugar a piezas sin defectos es mantener la distancia entre boquilla y substrato en un valor óptimo. Mientras que esto es importante en el caso del aporte de polvo, resulta crítico en el caso de trabajar con hilo, especialmente si se trata de un cabezal de hilo coaxial. Por otro lado, por su mayor madurez, la mayoría de los trabajos analizados han estado enfocados en el proceso LMD con aporte de polvo metálico. Es por este motivo que aún son necesarios avances en cuanto al conocimiento del proceso y la monitorización y control de este, especialmente aplicados al proceso LMD con aporte de hilo metálico.

Independientemente del formato de material de aporte, un segundo aspecto que puede tener influencia sobre la calidad de la pieza consiste en el sistema de movimiento del equipo LMD. La elección de una arquitectura de movimiento u otra (número de ejes, máquina o robot, empleo de posicionador o mesa rotatoria) es un aspecto que debe considerarse en función de la complejidad y tamaño de las piezas a fabricar, así como de la flexibilidad deseada. Además de la precisión del propio equipo, también debe prestarse especial atención a la programación de las trayectorias de aporte, aspecto que en el caso del LMD, aunque ya existen algunas soluciones comerciales, está aún en una etapa temprana de desarrollo.

En cuanto a la monitorización del proceso, la mayoría de los trabajos descritos en la bibliografía se centran en el aspecto térmico, generalmente mediante el uso de cámaras de visión o infrarrojas. Se ha comprobado cómo el rango de medida de la cámara dentro del espectro de la luz emitida, la resolución del sensor o el coste de cada tipo de cámara son criterios clave a la hora de determinar el sistema de monitorización. Ha quedado patente que la colocación idónea para una cámara enfocada a realizar un control térmico del baño fundido es de forma coaxial al láser. Sin embargo, se debe tener en cuenta que algunos puertos ópticos de cabezales filtran determinadas longitudes de onda que pueden coincidir con el rango de medida de la cámara.

Por otro lado, existe una tendencia por tratar de evitar y controlar las desviaciones de altura en la pieza. Para ello, se ha analizado la forma en la que algunos autores han incorporado una o varias cámaras a cierto ángulo respecto del cabezal de aporte. En algunos casos, incluso se ha iluminado la zona a procesar o se ha proyectado una línea láser de cara a obtener una medida de la altura del cordón aportado. Sin

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

embargo, en general, estas medidas han sido realizadas en piezas sencillas por lo que su aplicación sobre geometrías más complejas, con cambios de dirección, puede quedar limitada. Por este motivo, se han presentado soluciones de medición de pieza entre las sucesivas capas aportadas. Se trata de digitalizar la superficie de la pieza mientras que no se está aportando material, para así actuar sobre las siguientes capas a aportar. Aunque por el momento sea necesaria una interrupción del proceso para realizar la medida, la precisión de ésta puede ser superior a la obtenida mediante visión, y puede ser aplicada sobre cualquier patrón de aporte.

Finalmente, se han presentado algunos métodos alternativos de control de altura que, aunque están más lejos de poder ser comercializados, en un futuro podrían ser aplicados dando lugar a una medida más sencilla, económica, precisa y omnidireccional.

Así, y a la vista del estado del arte actual analizado, se propone como objetivo de este trabajo profundizar en algunas de las técnicas de monitorización y control descritas en el estado del arte. Tras el análisis de las referencias bibliográficas encontradas, se puede afirmar que la monitorización térmica del proceso se encuentra en una fase de desarrollo más avanzada que la geométrica. Es por ello por lo que este trabajo se ha enfocado en la monitorización geométrica del proceso, aun teniendo presente que el aspecto térmico es de gran relevancia y aún quedan aspectos por resolver. De una manera más específica, los retos aun sin solucionar que se abordarán en el trabajo presentado son enumerados a continuación:

- Corregir la altura de aporte de la pieza de forma robusta, simple e independiente de la dirección de aporte, para así aumentar la estabilidad del proceso.
- Detectar y corregir desviaciones de altura locales dentro de la capa.
- Controlar de la geometría aportada en el propio sistema de fabricación, reduciendo así el tiempo empleado en pruebas previas a la fabricación de la pieza final y en aportes fallidos.
- Detectar inestabilidades en el aporte de hilo metálico por unos parámetros de proceso inadecuados.
- Minimizar la aparición de defectos internos.

Los métodos ópticos de medida ofrecen la posibilidad de adquirir grandes cantidades de medidas en un tiempo muy reducido y sin la necesidad de un contacto

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

con la pieza. Estas ventajas convierten a los sistemas de medida tridimensional ópticos en idóneos para el proceso LMD. Las razones son las siguientes:

- Aunque la medida sea realizada tras el aporte de material, la pieza sigue estando sometida a temperatura, por lo que un sensor de medida por contacto podría dañarse al realizar el palpado.
- El proceso requiere de tomar una gran cantidad de medidas en un tiempo reducido para no afectar a los tiempos de enfriamiento de pieza y de proceso.
- Aunque la precisión pueda verse afectada por las condiciones de medida en el entorno industrial o por el efecto de la distorsión de la pieza debido a su temperatura, el proceso LMD cuenta con unas tolerancias más bastas que otros procesos ya que requiere de un mecanizado posterior, por lo que la precisión de estas soluciones de medida puede ser suficiente.

Este trabajo se ha centrado en el empleo de equipos de digitalización tridimensional basados en luz estructurada, ya que ofrecen la posibilidad de obtener un volumen de escaneo sin necesidad de mover el escáner por lo que resulta una solución más sencilla respecto a otros métodos basados en triangulación láser. Aun así, otros sistemas de medida tridimensional podrían ser igualmente válidos para controlar el proceso LMD, por lo que los desarrollos realizados podrían ser aplicados de manera similar. Esta medida es utilizada para detectar y corregir desviaciones de altura respecto de la altura teórica a alcanzar, aspecto que a la vista de la revisión bibliográfica realizada no está resuelto. Se presentarán las diferentes etapas desarrolladas a lo largo de este trabajo, hasta conseguir un control de altura capaz de medir y corregir tanto la altura de la capa completa como las desviaciones de altura dentro de la capa. En la Figura 46 se presenta un esquema con la metodología y el plan de ensayos llevado a cabo en los capítulos del trabajo.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Cap.	Metodología		Plan de ensayos
C.4	Análisis de la influencia de desviación de altura en proceso LMD	Aporte de polvo (LMD-P)	Fabricación de bloques con diferentes alturas de capa teóricas
		Aporte de hilo (LMD-W)	
C.5	Análisis de la precisión en trayectoria robótica y su efecto sobre el proceso LMD	Precisión en esquina	Fabricación de geometría pared en esquina y bloque con relleno tipo zig-zag
		Trayectorias de relleno de pieza	
C.6	Metodologías de calibración extrínseca del sistema de medida tridimensional	Configuración de escáner fijo	Digitalización de piezas y transformación de nubes de puntos a sistemas de coordenadas apropiados para el control geométrico
		Configuración de escáner montado en cabezal	
C.7	Metodologías de control de altura	Basado en la selección de las capas a aportar	Fabricación de demostradores del control de altura mediante LMD-P
		Basado en la generación de trayectorias adaptativas	
		Basado en el ajuste local de la tasa de aporte	Fabricación de demostradores del control de altura mediante LMD-W

Figura 46. Metodología y plan de ensayos de los capítulos principales del trabajo.

En todo caso, el fin de este trabajo es establecer una metodología de monitorización y control geométrico que puede ser aplicada en cualquier sistema de fabricación DED, independientemente de la configuración del proceso y de los parámetros de entrada empleados, siendo el proceso LMD un demostrador de la metodología desarrollada y que podría extrapolarse a otros procesos DED. De igual forma, por ser el proceso con una menor madurez y al mismo tiempo el que demanda una mayor precisión de monitorización, los desarrollos propuestos en este trabajo son de especial interés a su aplicación en el proceso LMD con aporte de hilo, siendo igualmente aplicables en el aporte de polvo metálico al requerir de una menor precisión.

Capítulo 3. Equipamiento empleado para la ejecución de los ensayos experimentales

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta, en primer lugar, el equipamiento empleado para la fabricación de las piezas, tanto para el aporte por láser del material en forma de polvo e hilo metálico.

Posteriormente, se describen los sensores empleados para la monitorización y control del proceso, realizando una división entre los equipos enfocados al digitalizado tridimensional de la geometría y los enfocados a la monitorización del proceso con sensores de visión.

Finalmente, se detallan las comunicaciones entre equipos de fabricación y sensores incorporados y los recursos de software empleados para la generación de trayectorias y monitorización y control del proceso.

3.2. Descripción del sistema de aporte LMD-P

El sistema de fabricación LMD-P (Figura 47a) cuenta con un láser de fibra de la marca IPG, modelo YLS-2000-CT de 2kW de potencia. El haz láser es guiado hasta el cabezal de aporte por medio de una fibra óptica de 0,6 mm de diámetro.

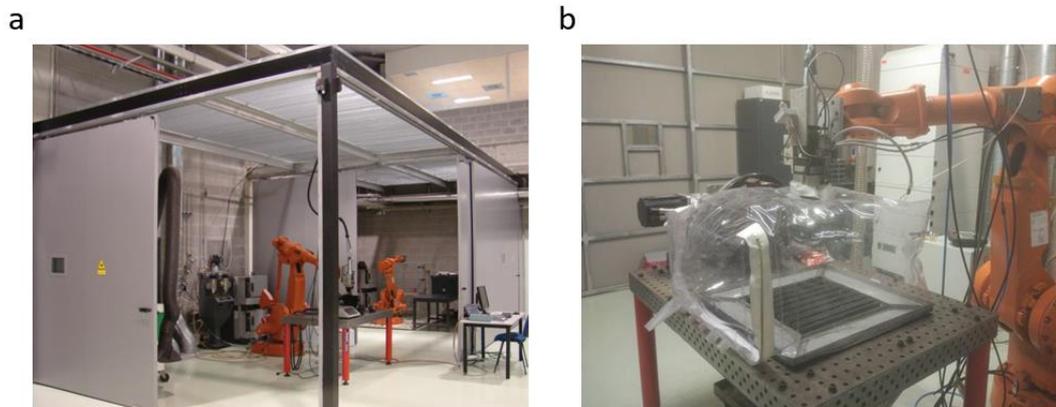


Figura 47. Celda de fabricación LMD-P. a) Fotografía general de la celda; b) cabezal de aporte equipado con la cámara de atmosfera inerte en la que se introduce un flujo continuo de argón para crear una atmosfera libre de oxígeno.

Durante el procesamiento de materiales susceptibles a la oxidación es posible equipar el cabezal con una cámara flexible de atmosfera inerte para crear una atmosfera libre de oxígeno, como la de la Figura 47b. Para comprobar la eficiencia de la atmosfera protectora creada gracias a la cámara, se realizó un experimento en el que se introdujo un caudal del argón al interior. El contenido de oxígeno fue

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

monitorizado dando lugar al gráfico de la Figura 48. Tras 20 minutos, la cantidad de oxígeno descendió hasta 10 ppm. Posteriormente, se cortó el flujo de argón y se comprobó cómo el contenido de oxígeno ascendió rápidamente hasta 20 ppm, manteniendo este valor durante aproximadamente 5 minutos. Después, el valor fue ascendiendo lentamente, manteniendo un valor inferior a los 100 ppm durante 40 minutos.

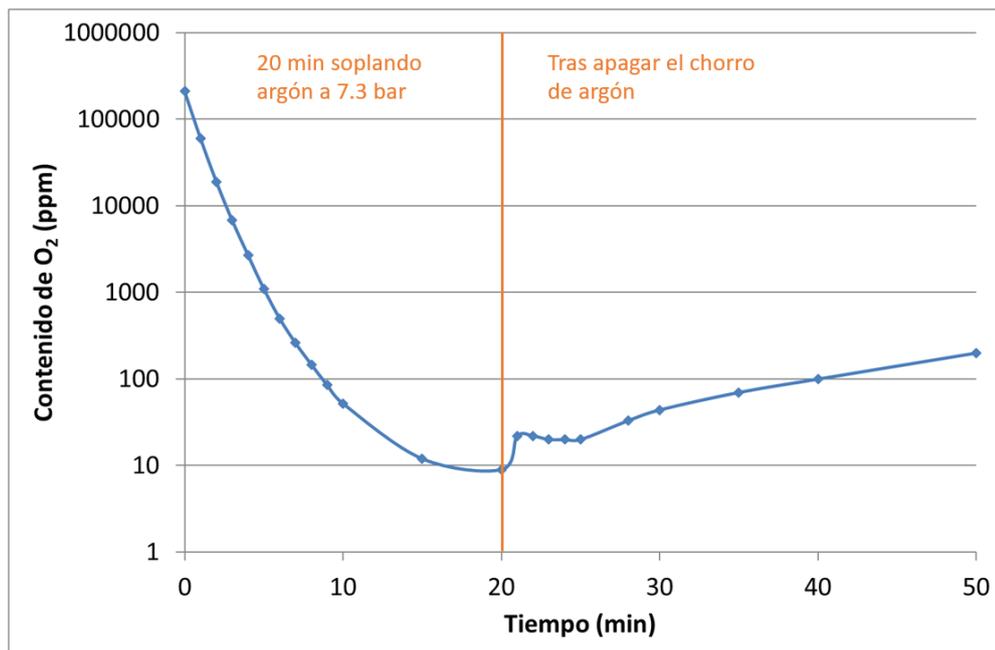


Figura 48. Evolución del contenido de oxígeno dentro de cámara de atmosfera inerte. Inicialmente se introduce un flujo de argón durante 20 minutos y posteriormente se detiene.

El cabezal de aporte, de la marca Precitec, está equipado con una boquilla de aporte de polvo discreta desarrollada por Fraunhofer ILT. En algunos ensayos, por otro lado, se ha hecho uso de una boquilla de aporte desarrollada en TEKNIKER (Figura 49). La particularidad de esta boquilla consiste en la posibilidad de ajustar la posición de la boquilla respecto de la lente de enfoque, pudiendo así ajustar el tamaño del spot láser empleado.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA



Figura 49. Boquilla de aporte desarrollada en TEKNIKER.

El movimiento del cabezal se consigue gracias a un robot industrial ABB IRB4400, mientras que el polvo es suministrado por un alimentador de polvo Sulzer Mecto Twin-10C.

3.3. Descripción del sistema de aporte LMD-W

La celda de fabricación LMD-W (Figura 50a) cuenta con el cabezal de aporte de hilo metálico coaxial COAXwire, comercializado por Fraunhofer IWS. De la misma forma que en la celda de LMD-P, puede emplearse una cámara de atmosfera inerte libre de oxígeno (Figura 50b).

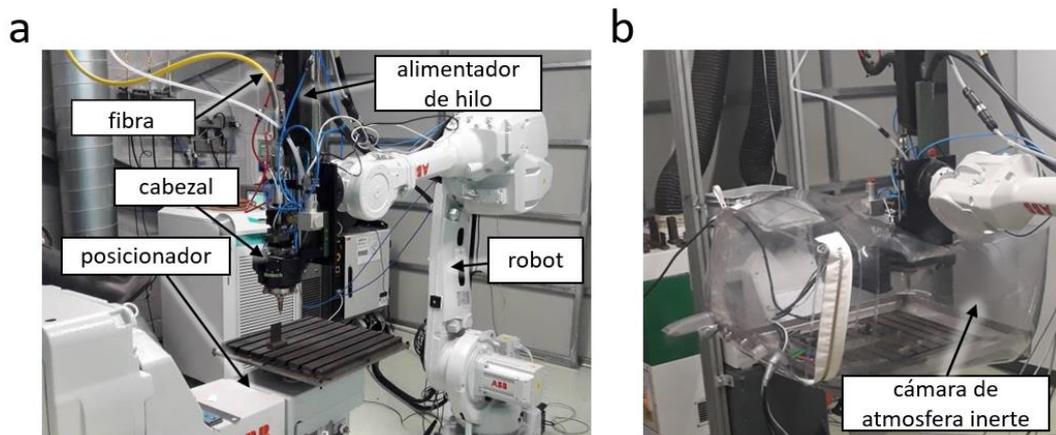


Figura 50. Sistema de fabricación LMD-W. a) Descripción de los elementos de la celda; b) cámara de atmosfera inerte.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Para introducir el hilo metálico hasta el cabezal de aporte se emplea un alimentador de la marca DINSE. El movimiento del cabezal se logra por medio de un robot de 6 grados de libertad de la marca ABB y modelo IRB4600-45. La energía para fundir el material es proporcionada por un láser IPG YLS 4000 S2T de 4kW de potencia máxima.

Por otro lado, además del movimiento del robot ABB IRB4600-45, este sistema robótico cuenta con un posicionador de dos ejes dispuestos en serie IRBP250A (Figura 50), lo que permite realizar movimientos coordinados entre ambos.

3.4. Equipamiento de monitorización y control

3.4.1. Escáner de medida tridimensional

A lo largo de este trabajo se han empleado diferentes escáneres de medida tridimensional. Aunque todos ellos han estado basados en la proyección de luz estructurada, se han empleado diferentes configuraciones de escáner y diferentes fuentes de proyección de luz.

Por un lado, en la Figura 51 se presenta el escáner de luz estructurada HP SLS3. Se trata de un equipo de bajo coste compuesto por un proyector de imagen y una cámara CCD. Mediante la proyección de diferentes patrones sobre la pieza y su captura con la cámara de visión el equipo es capaz de obtener una nube de puntos tridimensional de la pieza escaneada con una precisión de 0,05 mm. Este escáner ofrece la posibilidad de variar la distancia y ángulo entre proyector y cámara, pudiendo escanear así objetos de diferentes tamaños. Para obtener una buena precisión de medida, previamente al digitalizado de la pieza es necesario llevar a cabo una calibración con el patrón correspondiente al tamaño de la pieza. El escáner, además, cuenta con un software para el alineamiento, filtrado y fusionado de las nubes de puntos adquiridas.

Para digitalizar la geometría de las piezas aportadas, este escáner se coloca en una posición fija durante la fabricación de las piezas, obteniendo así un campo de visión que permite escanear la pieza durante todo el proceso de fabricación. Para mantener el escáner en una posición fija durante toda la fabricación se fabricó un soporte mediante la tecnología de FA de polímeros Fused Deposition Modeling (FDM). Este soporte cuenta con una base imantada que se acopla a la mesa de fabricación.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

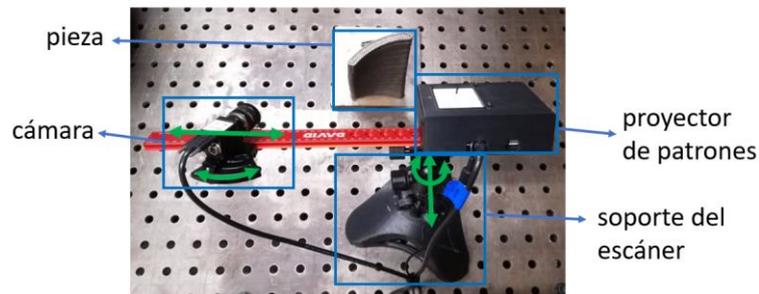


Figura 51. Escáner de luz estructurada HP SLS3.

Aunque la precisión del escáner HP SLS3 puede ser adecuada para el digitalizado de las piezas generadas por FA, ésta es muy dependiente de la calibración realizada. Por otro lado, la guía en la que están fijados cámara y escáner tiende a calentarse en el entorno de fabricación, lo que puede afectar también a la precisión de la medida. Finalmente, es necesario colocar el escáner cerca de la pieza fabricada lo que puede limitar el movimiento del cabezal robótico durante la fabricación.

Por los anteriores motivos, se decidió emplear un escáner más apropiado para entornos industriales y en particular para el proceso LMD. En este caso, se usó un escáner, de nuevo basado en luz estructurada, Photoneo Phoxi 3D (Figura 52). Este escáner está compuesto de un sistema de proyección de luz estructurada láser en una longitud de onda de 637 nm y una cámara de visión. Las distancias y orientaciones de estos elementos internos del escáner están fijados en una etapa de calibración intrínseca realizada por el fabricante, por lo que se evita este paso en la puesta a punto del equipo de medida. Por otro lado, el cuerpo de fibra de carbono proporciona resistencia y estabilidad térmica, lo que asegura una precisión adecuada en las medidas a lo largo del tiempo.

Finalmente, el escáner cuenta con un amplio rango de medida que permite el escaneo de piezas de gran tamaño a lo largo de su fabricación sin necesidad de mover el escáner o la pieza. La distancia del escáner al centro del posicionador robótico fue fijada en 1239 mm, como distancia óptima de escaneo recomendada por el fabricante del equipo. Con esta distancia, la resolución de los escaneos realizados fue de 0,524 mm, considerada como adecuada para el tamaño de las desviaciones que se pretenden corregir en el proceso LMD-W. El ángulo del escáner respecto de la vertical fue de 30°, permitiendo obtener un escaneo de la parte superior de la pieza durante su fabricación y evitar colisiones con elementos del cabezal de aporte.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

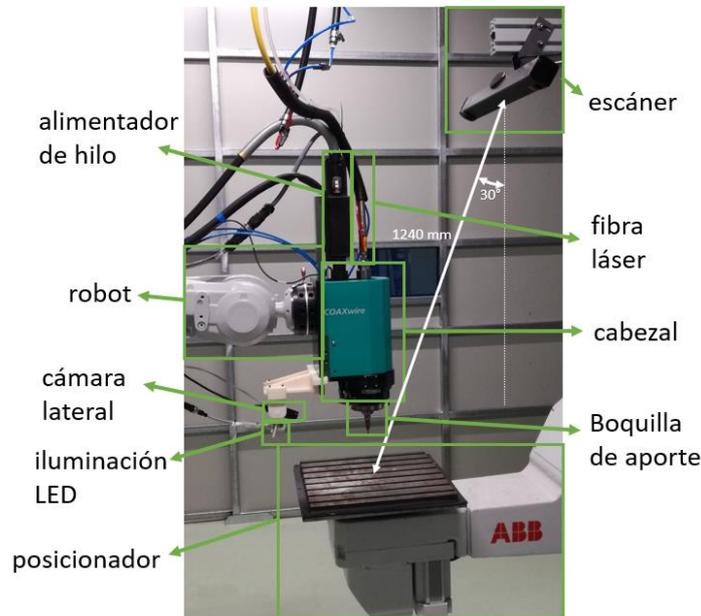


Figura 52. Configuración del escáner de medida basado en luz estructurada Photoneo Phoxi 3D en la celda de aditivo LMD-W.

La colocación del escáner en una posición fija consiste en una solución fácil de integrar en cualquier máquina o sistema robótico. Por otro lado, existe la limitación del volumen de medida del escáner, lo que puede suponer una restricción en el tamaño de la pieza a digitalizar. Además, debido a la necesidad de escanear el volumen completo de fabricación, por lo general, la resolución obtenida en la medida es menor que si se obtuvieran diferentes escaneos. Finalmente, esta configuración únicamente realiza el escaneo desde un punto de vista. Esto puede ser suficiente en el caso de que se quiera escanear la superficie superior de la pieza, para aplicar un control de altura de la pieza, pero, por otro lado, es insuficiente en el caso de que se quiera digitalizar la geometría completa y analizar las distorsiones de la pieza. Por este motivo, se plantea una alternativa en la que el escáner de medida es fijado junto al cabezal de aporte.

El escáner de medida en este caso se fijó en el cabezal de aporte mediante el utillaje mostrado en la Figura 53. Este utillaje, además, cuenta con una carcasa protectora y una ventana de vidrio a través de la cual se realizan los escaneos. De esta forma, es posible evitar daños en el escáner debidos a la exposición a vapores metálicos o al polvo metálico en el caso emplearlo en el proceso LMD-P.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

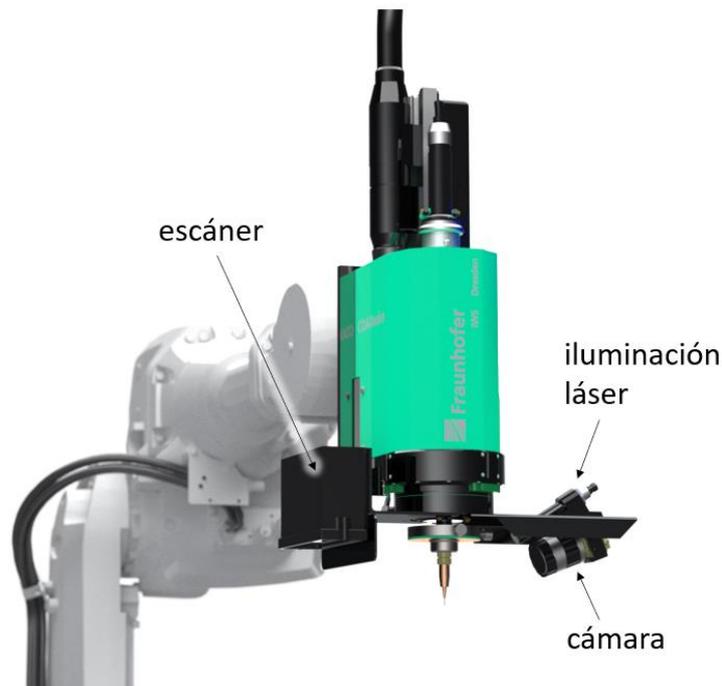


Figura 53. Sistema de monitorización fijado en el cabezal de aporte, con escáner de luz estructurada GOCATOR 3109, cámara de visión e iluminación láser.

El escáner empleado en este caso fue un GOCATOR 3109, basado en la proyección de luz estructurada. La fuente de la luz proyectada por este escáner es LED emitida alrededor de una longitud de onda de 460 nm. La precisión de la medida es de ± 50 μm . En este caso, el volumen de medida es menor que en las anteriores configuraciones de escáner fijas, por lo que, por lo general, son necesarios varios escaneos sobre las piezas fabricadas para obtener la nube de puntos de la pieza completa.

Las ventajas de esta solución frente a un escáner fijo son, por un lado, el aumento del volumen de escaneo, que únicamente se limita al alcance del robot, la posibilidad de orientar el escáner respecto a la pieza, permitiendo capturar de una mejor manera detalles de la geometría, y una mayor resolución en la nube de puntos capturada. Además, al contrario que la configuración en una posición fija del escáner, ésta permite introducir el escáner dentro de cámara de atmosfera inerte (Figura 54), por lo que es posible escanear materiales susceptibles a la oxidación. Por contrapartida, el tiempo necesario para escanear superficies de gran tamaño se ve aumentado por la necesidad de introducir un mayor número de escaneos y se introduce el error de posicionamiento del robot en la medida.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

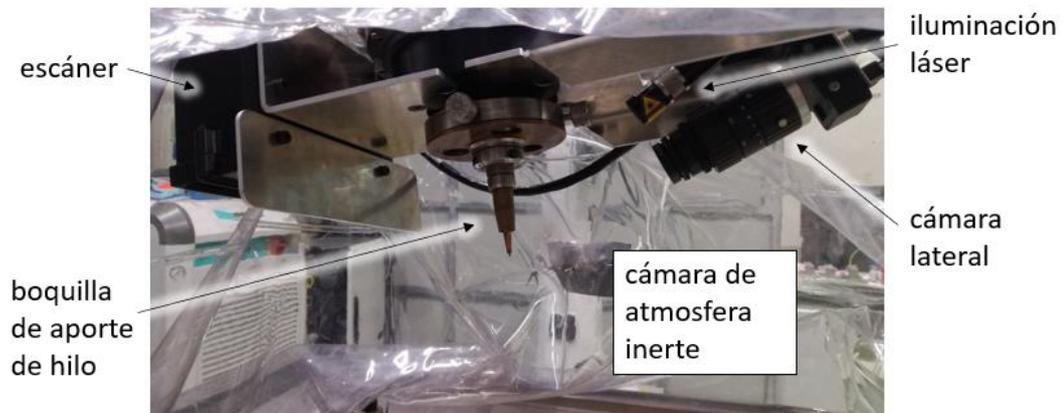


Figura 54. Configuración del sistema de monitorización y control dentro de la cámara de atmosfera controlada.

3.4.2. Equipamiento de visión

A lo largo de las pruebas se ha integrado un sistema de monitorización del proceso mediante visión. Tanto el cabezal del sistema de aporte LMD-P como el de LMD-W cuentan con puertos ópticos para la colocación de una cámara coaxial (Figura 55).

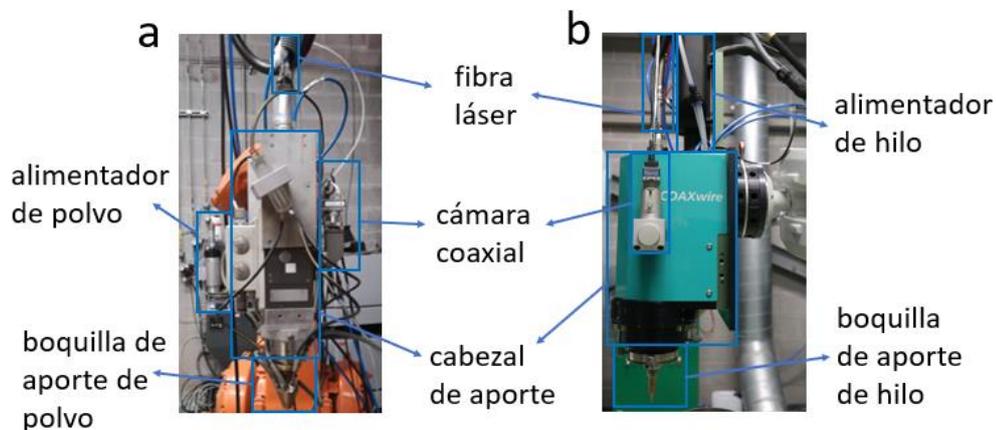


Figura 55. Elementos de los cabezales de aporte de las celdas LMD. a) Cabezal de LMD-P; b) cabezal de LMD-W.

En este caso la cámara coaxial empleada fue una cámara CMOS monocromática que mide en el rango visible y capta además parte del infrarrojo cercano. Cuenta con 2,5 megapíxeles y una frecuencia de adquisición de hasta 110 imágenes por segundo. En la Figura 56 se muestra la imagen del baño fundido obtenido mediante esta cámara para diferentes direcciones de movimiento del robot. Aunque en esta tesis no se ha abordado, esta imagen puede emplearse para el desarrollo de un control térmico fundamentado en la medición del tamaño del baño fundido.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

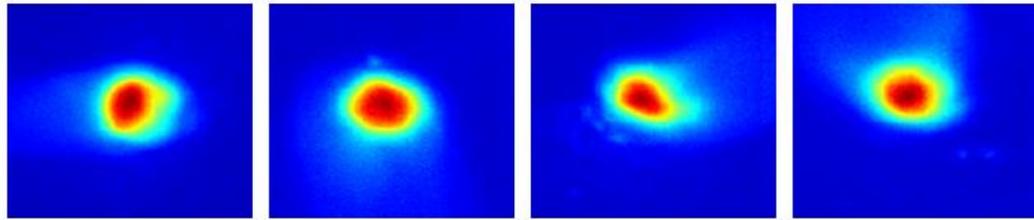


Figura 56. Imagen del baño fundido obtenido mediante cámara coaxial para el proceso LMD-W para diferentes direcciones de movimiento.

Para el caso del proceso LMD-W, adicionalmente se ha colocado un sistema de monitorización de la fusión del hilo metálico basado en una segunda cámara CMOS colocada de forma lateral. La monitorización de la interacción entre el hilo y el baño fundido requiere de una adecuada elección de iluminación y filtrado de la imagen.

En la Figura 57 se muestra una representación de la radiación capturada en proceso con un sistema de monitorización formado por una cámara, un filtro y una fuente de iluminación láser.

En la columna izquierda se visualiza el espectro de adquisición de una cámara sin filtrar y filtrada. La cámara de visión sin filtrar captura la luz emitida a lo largo de todo el espectro visible, mientras que, empleando un filtro estrecho, la adquisición puede limitarse a una banda más estrecha de longitudes de onda.

Por otro lado, la columna de la derecha muestra la radiación procedente del proceso que es capturada por la cámara en el caso de no filtrarla y en el caso de incorporar el filtro estrecho. La radiación emitida por el proceso es representada en azul, junto con una fuente de iluminación láser a una determinada longitud de onda, en verde. La radiación total del proceso es ilustrada mediante la línea amarilla discontinua. Según el análisis realizado por Ya et al. [130], el espectro de luz captado en el proceso LMD es la combinación de radiación de cuerpo negro junto con líneas discretas que aparecen debido a la interacción entre electrones, átomos e iones dentro del plasma excitado durante el proceso.

En el caso de no emplear un filtro, la adquisición del baño fundido capta toda esta radiación por lo que la imagen alcanza rápidamente la saturación. Sin embargo, es posible incorporar un filtro estrecho, a la longitud de onda de la iluminación láser. De este modo, aunque siga existiendo cierta radiación del plasma inducido por el proceso, la aportación de la iluminación láser respecto a la radiación del proceso es mayor. Esto queda evidenciado al comparar el área bajo la curva verde respecto al

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

área bajo la curva amarilla discontinua en el caso de emplear o no emplear un filtro en la cámara.

Por último, cabe destacar la importancia de elegir un filtro suficientemente estrecho para captar la menor radiación del proceso posible y de contar con un láser de iluminación con una potencia suficiente.

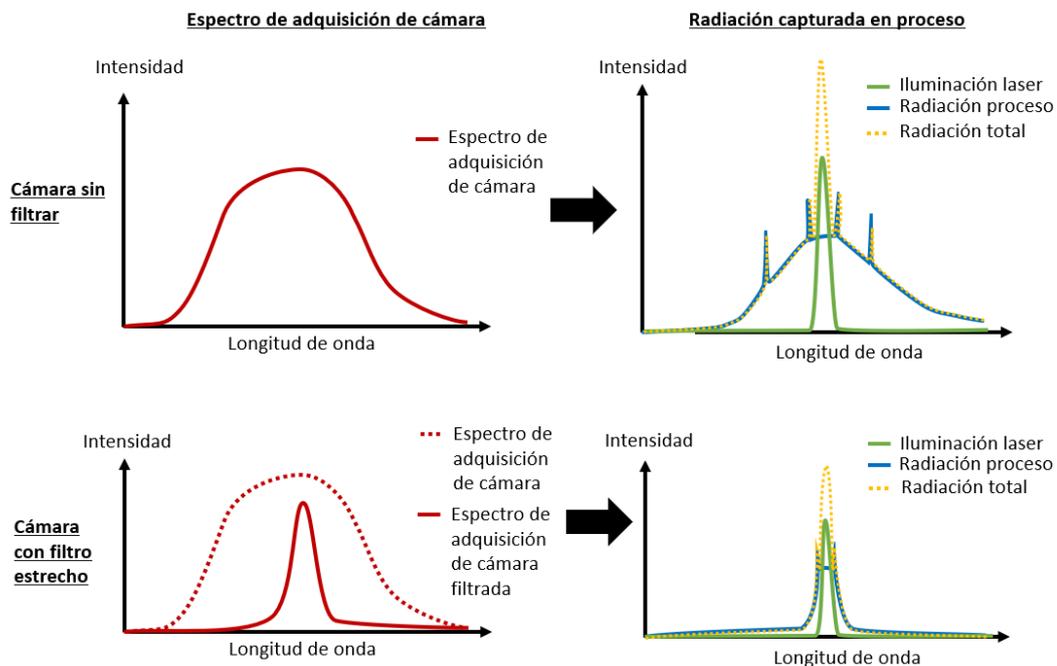


Figura 57. Representación de la intensidad de luz capturada en el proceso LMD-W por el sistema de iluminación lateral. Columna izquierda: espectro de adquisición de cámara filtrada y sin filtrar; columna derecha: radiación capturada en proceso con cámara filtrada y sin filtrar.

Para ilustrar la importancia de una adecuada iluminación láser en la Figura 58 se presentan algunas capturas realizadas con diferentes configuraciones de cámara lateral. Por un lado, en la Figura 58a la imagen fue capturada sin ningún tipo de iluminación. Puede verse cómo el baño fundido queda saturado incluso antes de llegar a observar el hilo metálico. Por otro lado, en la Figura 58b se incorporó una fuente de iluminación LED. Aunque es posible llegar a observar mínimamente el hilo metálico, se observa saturación en el baño fundido debido a que la radiación del proceso es mayor que la de la fuente de iluminación LED. Por último, en la Figura 58c se presenta una imagen capturada mediante una cámara de alta velocidad. Aunque se observa el baño fundido con gran detalle, para llegar a observar el hilo metálico habría que emplear una potente fuente de iluminación, como por ejemplo la comercializada por la empresa CAVITAR [131]. Aunque la combinación de una cámara de alta velocidad con un sistema de iluminación de alta

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

potencia ofrece una imagen del proceso óptima, cuenta con la desventaja del alto coste del equipamiento. Además, la alta frecuencia de adquisición de la cámara provoca que sea inviable por limitaciones de memoria adquirir procesos largos.

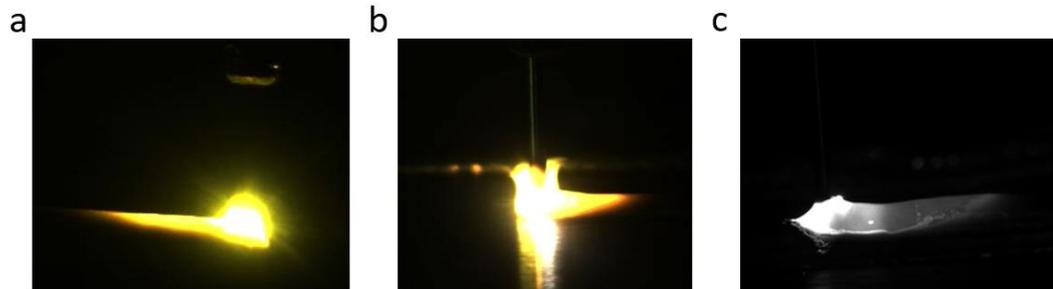


Figura 58. Captura de la imagen del proceso LMD-W mediante diferentes configuraciones de cámara e iluminación en sistema de monitorización lateral. a) Cámara CMOS; b) cámara CMOS con iluminación LED; c) cámara de alta velocidad.

La alternativa para monitorizar el proceso, aunque con menor frecuencia de adquisición, consiste en el empleo de una cámara CMOS industrial, un láser de iluminación y un filtro equipado en el objetivo de la cámara. La configuración de este sistema en el cabezal de LMD-W puede verse en la Figura 54.

La ventaja de una iluminación láser es que es capaz de concentrar su radiación en un estrecho rango de longitudes de onda. Mediante la incorporación de un filtro estrecho a la longitud de onda del láser se obtiene una adecuada visión de la interacción entre el hilo metálico y el baño fundido, como se observa en la Figura 59.

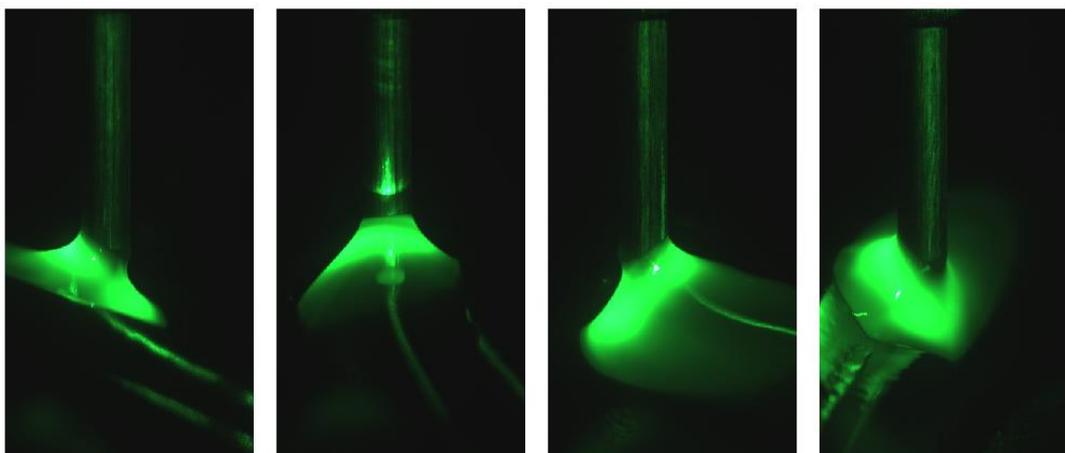


Figura 59. Imagen de la interacción entre el hilo metálico y el baño fundido, obtenido mediante sistema de monitorización compuesto por cámara lateral e iluminación láser para diferentes direcciones de movimiento.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

La monitorización lateral del hilo ofrece una visión especialmente útil para el usuario del sistema de fabricación LMD-W, ya que, junto con la experiencia de éste, permite detectar condiciones de proceso inapropiadas o fallos que se han dado en el proceso y requieren de una detención para su corrección. Este es el caso, por ejemplo, de la formación de una gota como la de la Figura 60. En la secuencia de imágenes se observa cómo se forma la bola, aumenta su tamaño debido a que el hilo metálico continúa siendo insertado y finalmente la bola cae quedando adherida a la pieza.

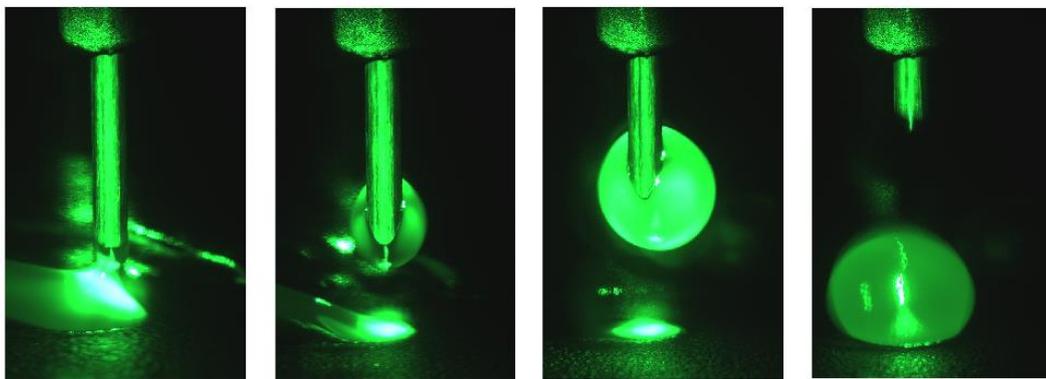


Figura 60. Formación de una bola en proceso capturada con el sistema de monitorización lateral.

3.5. Protocolos de comunicación

En el esquema de la Figura 61 se presentan las comunicaciones existentes durante el proceso LMD en el que se emplea el sistema de monitorización y control desarrollado.

Por un lado, el control de los diferentes componentes del sistema de fabricación (equipo de seguridad, láser de proceso, alimentador de polvo o hilo, robot) se realiza por medio de un PLC y el protocolo de comunicación industrial Profinet.

El robot, por otro lado, ejecuta dos tareas en paralelo. La primera tarea consiste en la tarea de proceso, y en ella se introduce el movimiento del robot y otros eventos que marcan el funcionamiento de la fabricación como el encendido o apagado del láser. En esta tarea, además son cargados los programas robóticos generados con las trayectorias de aporte, que son transferidos desde el PC al disco duro del robot a través del protocolo File Transfer Protocol (FTP). La tarea de control, en cambio, es empleada para establecer una comunicación a través de sockets de Ethernet con un PC externo dedicado a controlar los sensores incorporados en el proceso. Mediante la tarea de control ejecutada en el robot y una aplicación de Matlab

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

ejecutada en el PC es posible, por ejemplo, establecer el momento en el que debe iniciarse o detenerse la captura de alguna de las cámaras, realizar un escaneo o enviar señales del robot como el posicionamiento de éste.

La comunicación entre el PC y las cámaras de visión coaxial y lateral se realiza por medio de una comunicación ethernet y el protocolo de comunicación GiGE Vision, integrado en Matlab. Por otro lado, la comunicación entre el PC y el escáner de medida tridimensional se realiza por una conexión con sockets y un protocolo definido por el fabricante del equipo.

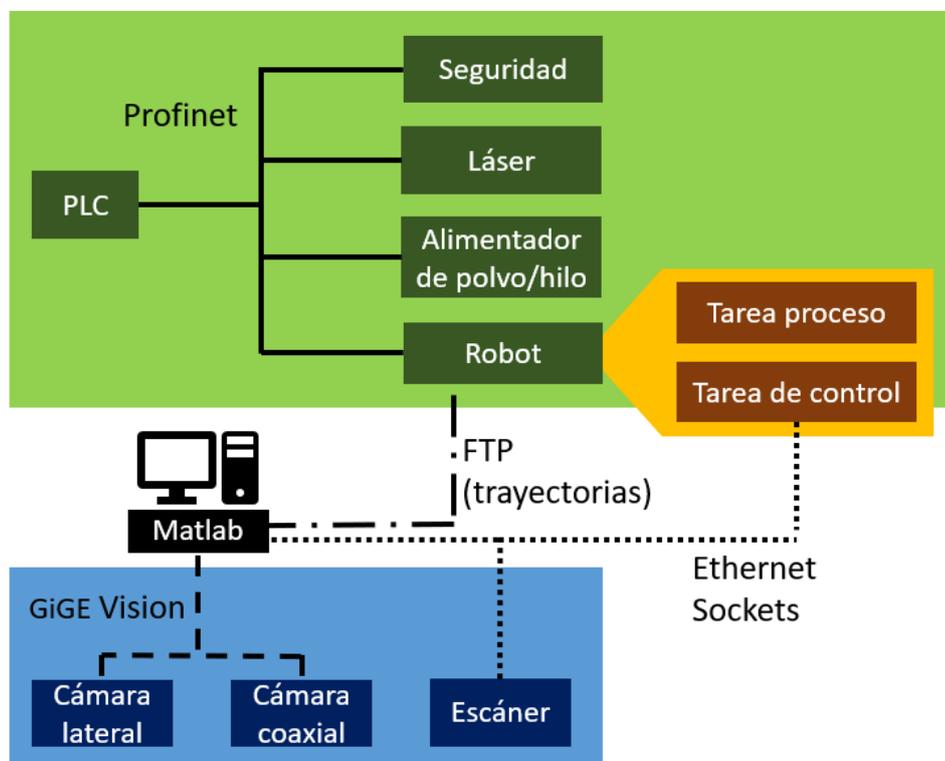


Figura 61. Esquema de protocolos de comunicación empleados en proceso

3.6. Software

Para la realización de este trabajo se ha empleado el software TekAM®, desarrollado por Tekniker. Este software, generado en el entorno de programación de Matlab, cuenta con diferentes complementos o add-ons que realizan diferentes funciones para asistir al proceso de aporte. Entre los add-ons incorporados se encuentran los siguientes:

-Generación y simulación de trayectorias:

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- Generación de trayectorias en 3 ejes.
- Generación de trayectorias en 6 ejes.
- Generación de trayectorias en 6+2 ejes.
- Simulación de trayectorias robóticas (necesario software de simulación ejecutado en paralelo).

-Monitorización de proceso:

- Monitorización mediante cámaras de visión monocromáticas, RGB e infrarrojas.
- Visualización y edición de videos monitorizados.

-Digitalización de la geometría:

- Control de altura basado en medición tridimensional, junto con calibración extrínseca del escáner de medida.
- Control geométrico de la pieza fabricada, con comparativa contra el CAD teórico.

3.6.1. Generación de trayectorias CAM

Algunas de las capacidades del software TekAM® para la generación de trayectorias fueron descritas por Flores et al. en [81]. Este add-on permite importar la geometría a fabricar, posicionarla y rotarla y generar las trayectorias de aporte de la pieza. Existen numerosas opciones disponibles para la generación de las trayectorias, como varios patrones de relleno o el empleo de trayectorias híbridas compuestas de rellenos y contornos. En la Figura 62a se muestra la detección de los puntos dentro de la geometría, en la Figura 62b la unión de estos puntos para formar las trayectorias de relleno tipo zig-zag y finalmente, en la Figura 62c se encuentran los contornos de la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

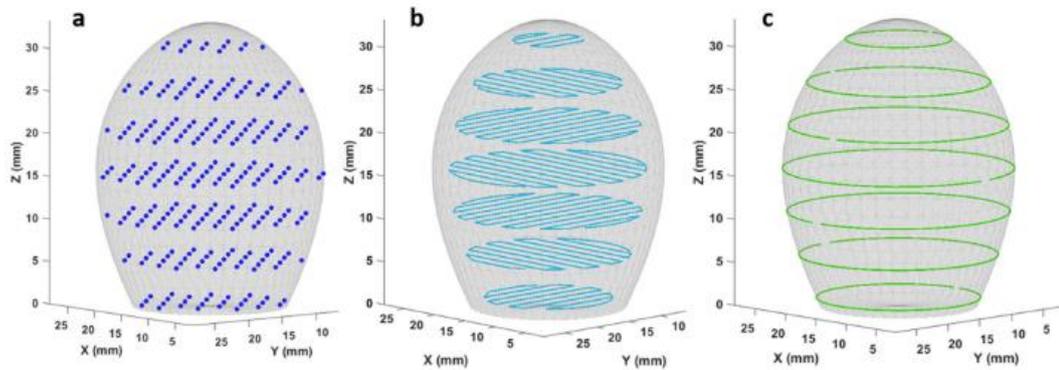


Figura 62. Generación de trayectorias a partir de pieza en formato .STL [81]. a) Detección de puntos dentro de la geometría; b) trayectoria zig-zag de relleno; c) trayectoria de contorno.

Otras de las opciones con las que cuenta el software es la capacidad de generar trayectorias robóticas en 6 ejes, con reorientación del cabezal en los contornos (Figura 63), la coordinación de movimiento entre un robot y un posicionador de dos ejes (trayectorias en 6+2 ejes) o la capacidad de generar piezas con grandes inclinaciones mediante la generación de capas no planas que se adapten a la inclinación de la geometría.

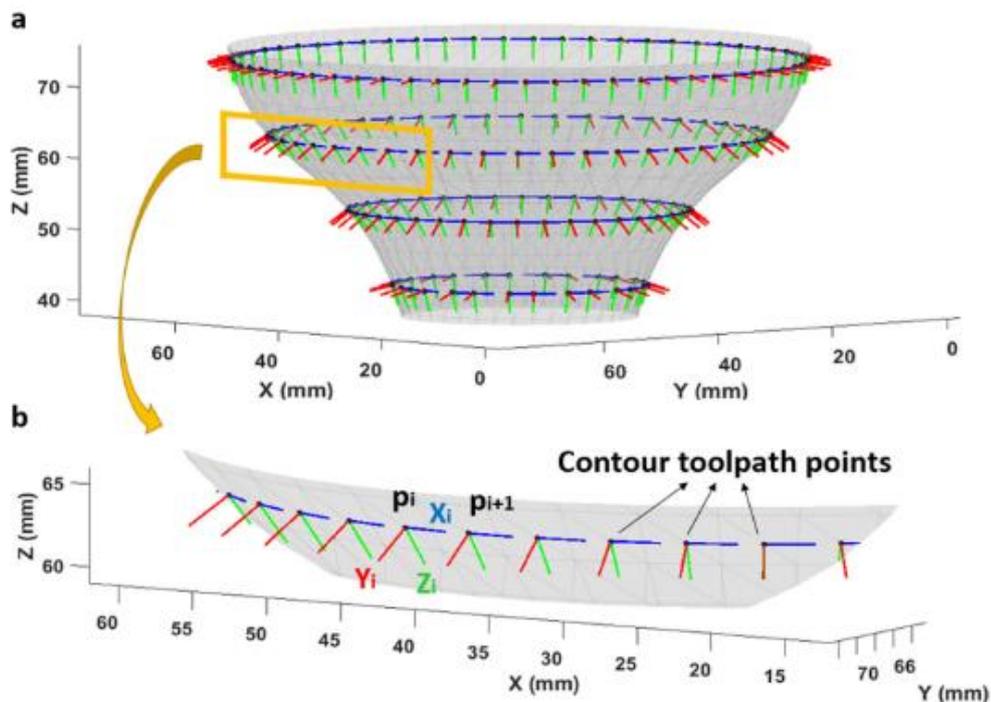


Figura 63. Puntos que componen la trayectoria de aporte del contorno de la geometría con reorientación del cabezal. a) Representación de los sistemas de coordenadas de los puntos del contorno que definen la posición y orientación del cabezal de aporte; b) vista detallada de los puntos del contorno.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En el caso de las trayectorias robóticas es posible realizar una simulación de estas en un software de simulación ejecutado en paralelo. De esta forma, pueden detectarse colisiones, límites de los ejes del robot o el paso por posiciones singulares del robot.

Por otro lado, el código generado ha sido adaptado a diferentes lenguajes robóticos y lenguaje CNC.

3.6.2. Monitorización y control

En cuanto a la monitorización del proceso, el software TekAM® cuenta con la posibilidad de conectar y configurar varias cámaras tanto visibles como infrarrojas. Además, se incluyen herramientas para la visualización y edición de los videos una vez capturados.

Por otro lado, incorpora la posibilidad de conectar un escáner de medida tridimensional. Mediante la conexión entre el robot, el PC y el escáner es posible realizar una calibración extrínseca del escáner, en la que las coordenadas del escáner se transforman a coordenadas de trabajo del robot, y realizar escaneos a través de la propia aplicación. Además, es posible aplicar un procesado sobre la nube de puntos, como la definición de un volumen de interés o el cosido, filtrado o reducción de la nube de puntos. Finalmente, este add-on incorpora un control de altura mediante el que las trayectorias de aporte pueden ser ajustadas in-process en función de la medida tridimensional.

Capítulo 4. Estudio de la influencia de la distancia entre boquilla de aporte y pieza en el proceso LMD

4.1. Introducción

En el apartado 2.6.2 se han presentado varios estudios que han tratado de determinar y controlar el crecimiento de la pieza. La gran mayoría de ellos destacan la importancia de mantener constante la distancia entre boquilla de aporte y pieza para así obtener unas condiciones de proceso óptimas en cuanto a eficiencia, calidad y uniformidad de los aportes.

Sin embargo, un aspecto que no queda claro es el efecto que una desviación de altura puede tener sobre el aporte de una pieza. En este capítulo se trata de responder a cuestiones tales como cuál es la distancia mínima y máxima con la que se puede trabajar en el proceso LMD antes de que se produzca el fallo del proceso, qué tipos de fallos son los que se dan en caso de una desviación positiva o negativa, que diferencias existen en el caso del aporte de polvo o hilo metálico o cómo afecta esta distancia a la eficiencia del proceso.

En primer lugar, se describe la nomenclatura que es empleada durante todo el documento para denominar los parámetros de crecimiento de la pieza. Igualmente, se realizan pruebas experimentales sobre los procesos LMD-P y LMD-W para tratar de dar respuesta a las cuestiones formuladas.

4.2. Terminología empleada para definir el crecimiento de la pieza

La Figura 64 muestra una vista esquemática del aporte de una capa en una pieza. El material aportado en la última capa se muestra con un relleno diagonal. Como base para el aporte de la capa se parte de la altura de la pieza alcanzada en la capa anterior.

Al crecimiento esperado en la pieza, se le ha denominado altura de capa teórica. Este crecimiento teórico a partir de la altura de la pieza en la capa anterior da lugar a la altura de la pieza teórica. Sin embargo, el crecimiento real de la capa, o altura de capa real, difiere en general de la altura de capa teórica. De igual forma, la altura alcanzada en la pieza o altura de pieza real difiere de la altura de pieza teórica. A la diferencia entre la altura de la pieza real y la altura de la pieza teórica se le ha denominado error de altura.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

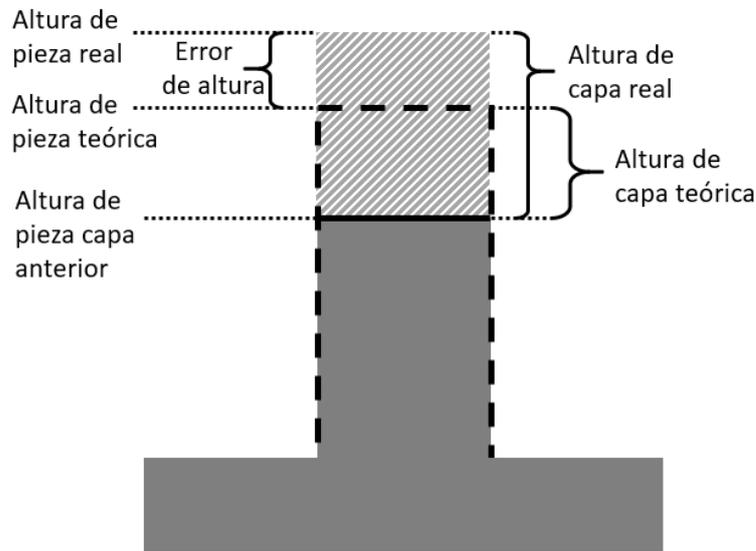


Figura 64. Esquema del crecimiento de la pieza tras el aporte de una capa con la terminología empleada para definir los parámetros de crecimiento.

Cabe destacar que la altura de capa teórica es además el desplazamiento vertical que realiza el cabezal entre el aporte de diferentes capas. Por otro lado, en este documento la altura de la pieza real será considerada como la altura determinada por medio de la digitalización tridimensional de la pieza, tomando esta medida como verdadera, es decir, despreciando la incertidumbre en la medida de la pieza.

En la Tabla 4 se recogen los parámetros relacionados con la monitorización y control de la altura de la pieza y las variables que son empleadas a lo largo de este documento para denominarlos.

Parámetro	Variable
Altura de pieza real	h_r
Altura de pieza teórica	h_t
Altura de capa real	l_r
Altura de capa teórica	l_t
Error de altura	e

Tabla 4. Parámetros relacionados con la monitorización y control de la altura de la pieza y variables empleadas a lo largo del trabajo para su denominación.

4.3. Influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso LMD-P

Para estudiar la estabilidad del proceso LMD-P ante desviación de altura se fabricaron hexaedros como el mostrado en la Figura 65 con diferentes alturas de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

capa teóricas. Estos hexaedros tienen una sección cuadrada de 25 mm de lado y una altura aproximada de 80 mm. Además, en uno de los hexaedros fabricados se aplicó un control de altura, que será descrito en el apartado 7.3, en el que la posición del robot en la dirección de crecimiento de la pieza se adaptó a la altura real de esta en todo momento.

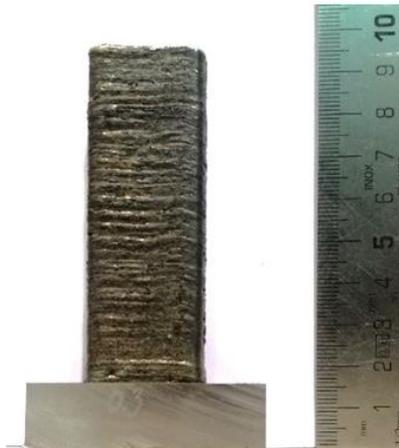


Figura 65. Hexaedro fabricado por LMD-P con una altura de capa teórica de 0,3 mm.

La fabricación se realizó con una potencia láser de 2200 W, una velocidad de avance del robot de 15 mm/s y un caudal de polvo de 15 g/min. Se estableció el valor de solape en un 40% del ancho del cordón individual, de 2,5 mm, por lo que la distancia entre cordones fue de 1,5 mm.

Potencia láser (W)	Caudal de material (g/min)	Velocidad de avance de robot (mm/s)	Caudal de gas de protección, argón (l/min)
2200	15	15	12

Tabla 5. Parámetros del proceso LMD-P empleados para el estudio de la influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso.

Para medir el crecimiento de la pieza, cada cierto número de capas la superficie superior de la pieza fue escaneada. La diferencia entre la altura de la pieza teórica y la altura la pieza real, dio como resultado un error de altura, e . La Figura 66a muestra el valor medio de la altura de capa real, es decir, tras el aporte del grupo de capas aportado previamente, en función de la altura alcanzada en la pieza. Por otro lado, en la Figura 66b se grafica el error de altura en función del crecimiento de la pieza. En ambos casos, las gráficas incluyen curvas obtenidas para diferentes alturas de capa teóricas y el caso en el que se aplica el control de altura.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Puede observarse cómo en los casos en los que la altura teórica fue menor que la altura de capa real, $h_t = 0,3$ mm, 0,6 mm y 0,7 mm, la pieza creció más de lo esperado y por tanto el error de altura tomó valores positivos. Además, el error creció con mayor rapidez cuanto menor fue la altura de capa teórica. Por otro lado, el error de altura y la altura de capa real alcanzaron un valor en el que se estabilizaron. La altura de capa real, a partir de ese instante, tomó un valor similar a la altura de capa teórica, creciendo por tanto únicamente la altura que el movimiento vertical del robot entre capas permitió. Este estado de auto-compensación es también comentado en [51].

Cuando la altura de capa teórica fue mayor que la altura de capa real, $h_t = 0,9$ mm y 1,2 mm, el error de altura tomó valores negativos, es decir, la pieza creció menos de lo esperado. En este caso, el error de altura tomó valores cada vez más negativos y no alcanzó un valor de estabilización, llegando incluso al fallo del aporte para la altura de capa teórica $h_t = 1,2$ mm. Puede apreciarse incluso cómo la altura de capa real disminuyó para este caso a medida que el error de altura tomó valores más negativos.

Con la aplicación del control de altura, por otro lado, el error de altura fue mantenido dentro de un rango de 0,3 mm. Puede verse como la pieza creció menos en las primeras capas, debido a una menor temperatura de la pieza y a una mayor disipación del calor en la base. El control de altura corrigió este efecto ajustando el valor de la altura de capa teórica en el aporte del siguiente grupo de capas (en este caso compuesto por grupos de cuatro capas a diez capas). Del mismo modo, actuaría sobre piezas con sección variable en la que la disipación de la temperatura puede variar afectando el crecimiento de la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

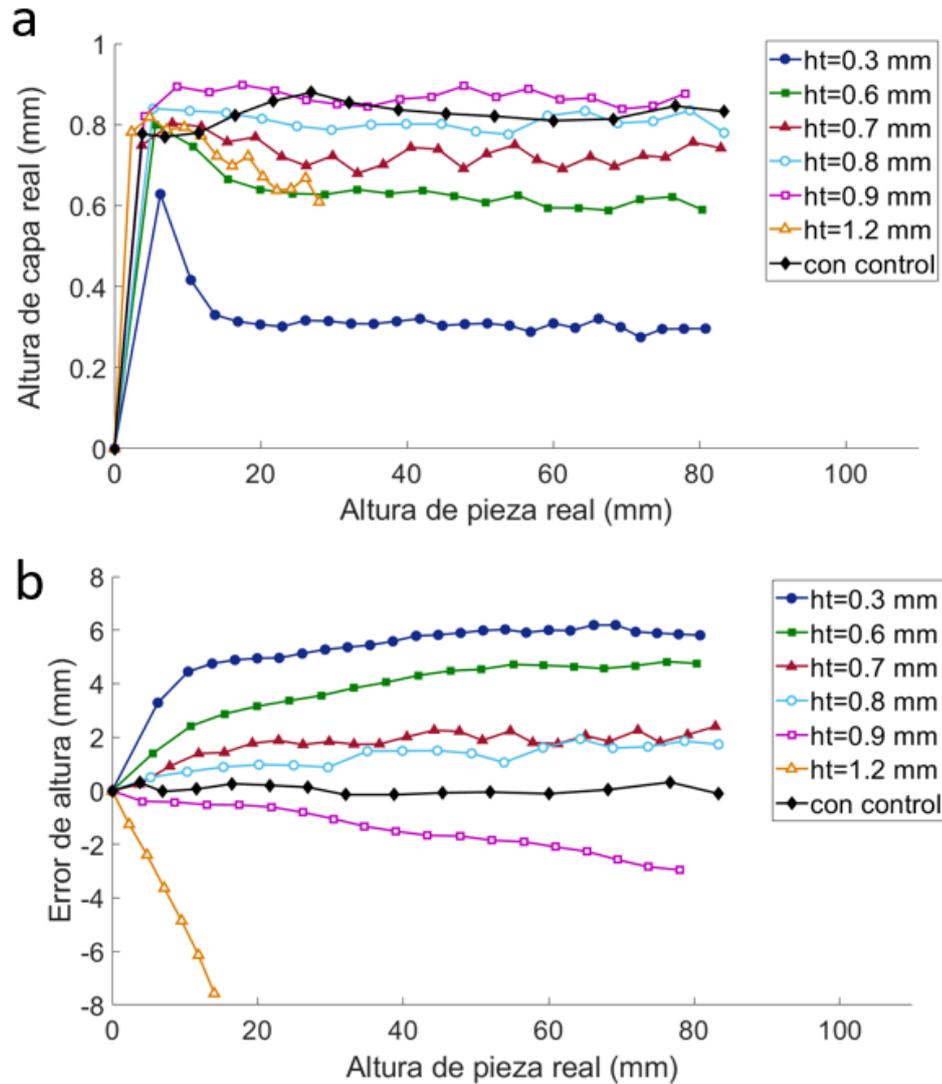


Figura 66. Altura de capa real para cada grupo de capas aportado y evolución del error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para el proceso LMD-P. a) Altura de capa real determinada por el escáner; b) error de altura.

Además de entender la influencia de la altura de capa teórica sobre el crecimiento de la pieza, las pruebas realizadas sirvieron para medir la eficiencia de atrapamiento de polvo. En la Figura 67 se muestra el porcentaje de atrapamiento de polvo y la tasa de aporte de material respecto de la altura de capa teórica. Este valor consiste en la cantidad de material que forma parte de la pieza tras su fabricación respecto de la cantidad de material total consumido en el proceso. Mediante esta gráfica se evidencia la gran dependencia de la eficiencia del proceso ante la definición de la altura de capa teórica. Mientras que una altura de capa teórica menor que la altura de capa real da lugar a una situación de estabilidad, esto es a costa de una gran

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

cantidad de polvo no fundido, que puede disminuir en gran medida la eficiencia del proceso. Por otro lado, la mayor eficiencia de atrapamiento de material y tasa de aporte se da para los casos en los que la altura de capa teórica es similar a la altura de capa real. Este es el caso de la prueba realizada con la aplicación del control de altura. Puesto que en este caso la altura de capa teórica no toma un valor constante, en la Figura 67 se ha representado mediante una línea roja horizontal. Cabe destacar cómo estas tasas de aporte de material y eficiencias son calculadas para unos parámetros de aporte determinados, pudiendo variar para otras combinaciones de parámetros de proceso.

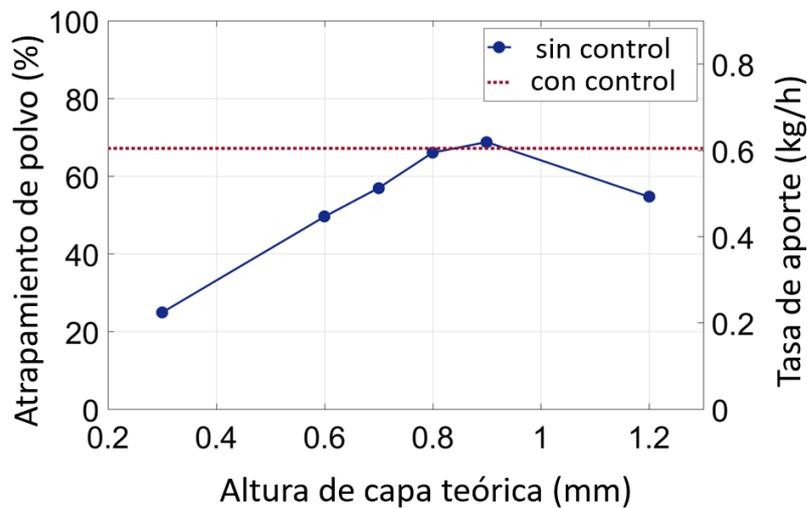


Figura 67. Porcentaje de atrapamiento de polvo y tasa de aporte de material en función de la altura de capa teórica. La línea roja horizontal representa la eficiencia en el caso de la aplicación del control de altura.

En la Tabla 6 se resumen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en cuanto a tiempo de fabricación, eficiencia de atrapamiento de polvo y tasa de aporte de material.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Altura de capa teórica h_t (mm)	Tiempo de fabricación (minutos)	Eficiencia de atrapamiento de polvo (%)	Tasa de aporte (kg/h)
0,3	112	24,87	0,22
0,6	59	49,55	0,45
0,7	54	56,92	0,51
0,8	48	66,04	0,59
0,9	42	68,76	0,62
1,2	Fallido	54,65	0,49
Control de altura	49	62,81	0,57

Tabla 6. Resultado de las piezas fabricadas con diferentes alturas de capa teóricas y el caso de la aplicación del control de altura para el proceso LMD-P.

Por otro lado, es evidente cómo un error de altura positivo da lugar a una distancia entre la pieza y la boquilla de aporte mayor que la óptima, mientras que un error de altura negativo supone una distancia entre la pieza y la boquilla menor que la óptima. A modo de resumen se muestra la Figura 68 en la que se plantean las situaciones de una distancia entre cabezal y pieza insuficiente, excesiva y óptima. En el caso de una distancia insuficiente, se alcanza la estabilidad a costa de una disminución de la eficiencia del proceso. Por el contrario, si la distancia es excesiva puede llegar a bajar la eficiencia y la estabilidad se ve perjudicada. Solamente en el caso de mantener una distancia óptima, gracias a la aplicación de un control de altura es posible mantener la estabilidad del proceso con una eficiencia de material máxima.

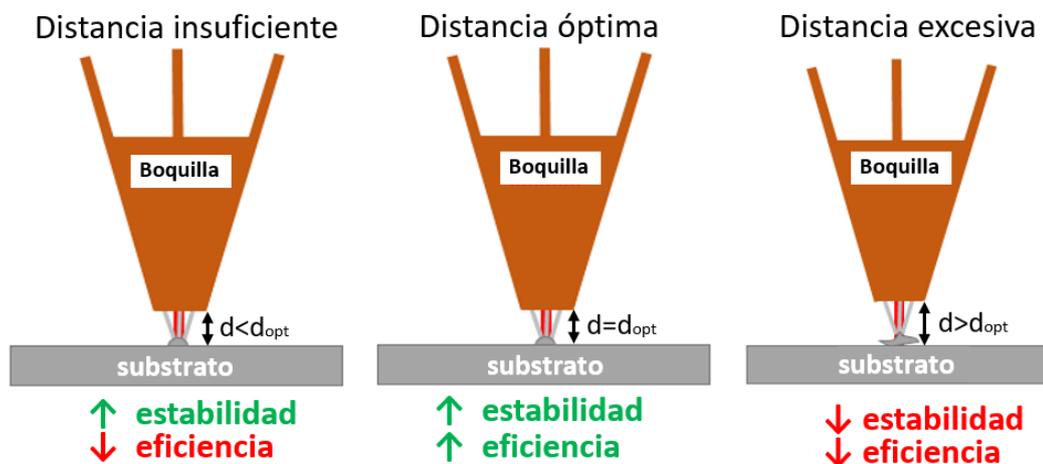


Figura 68. Diferentes situaciones de distancia entre boquilla de aporte y pieza, mostrando el efecto sobre la estabilidad del proceso y la eficiencia de atrapamiento de material.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

4.4. Influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso LMD-W

Mantener una distancia adecuada entre cabezal y pieza es un aspecto aún más relevante en el caso del LMD-W. En el apartado 4.3 ha quedado evidenciado cómo, para el LMD-P, es posible aportar material con una altura de capa teórica incorrectamente definida incluso alcanzando una situación de estabilidad y auto-compensación a costa de una menor eficiencia de atrapamiento de material. En el caso del LMD-W, la eficiencia de atrapamiento de material es prácticamente el 100%, debido a que la totalidad del material insertado es fundido. Esto representa una ventaja competitiva respecto del LMD-P, aunque también dificulta la consecución de un proceso estable.

Los principales fallos del proceso de aporte LMD-W consisten en el goteo de material (Figura 69a) y el enganche del hilo metálico (Figura 69c). El goteo de material se da cuando el material se funde por encima de la superficie de aporte, y puede ser debido a una potencia excesiva, a una velocidad de movimiento insuficiente en comparación con la tasa de aporte del hilo o una altura de aporte excesiva. Por otro lado, el enganche del hilo metálico se da cuando la energía aportada al hilo es insuficiente, por un exceso de velocidad de movimiento, una potencia insuficiente en comparación con la tasa de aporte de hilo o un descentramiento del hilo respecto de láser. Únicamente cuando se aporta con una potencia y velocidad de movimiento adecuadas para la tasa de aporte de hilo, una distancia entre cabezal y pieza adecuada, y con el hilo perfectamente centrado en el spot láser es posible alcanzar un aporte óptimo (Figura 69b).

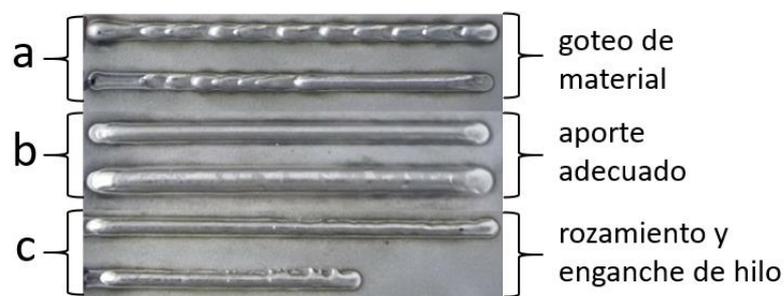


Figura 69. Aporte de cordones individuales. a) Defecto de goteo de material; b) aportes con condiciones adecuadas; c) aportes con rozamiento y enganche de hilo.

La adecuada definición de los parámetros de aporte es un punto que normalmente se afronta mediante una experimentación previa. Por otro lado, el centrado del hilo en el spot laser es un aspecto importante que debe realizarse con precisión para

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

compensar pequeñas desviaciones que pueda tener el hilo durante el proceso. Finalmente, otro aspecto crítico es la distancia entre cabezal y pieza, que en el caso de los cabezales de aporte de hilo coaxial supone un gran cambio de la forma del spot laser en el plano de aporte. La Figura 70a muestra el cabezal de aporte desarrollado por Fraunhofer IWS. En él se ve cómo el láser es enfocado en el hilo metálico para su aporte. Para ello, es necesario dividir el haz laser principal mediante un prisma, para después volverlo a enfocar por medio de varios espejos (Figura 70b). El ángulo entre el hilo y los haces láser divididos debe ser lo suficientemente grande para evitar la colisión con la boquilla de aporte, pero está limitado por el diseño compacto del cabezal.

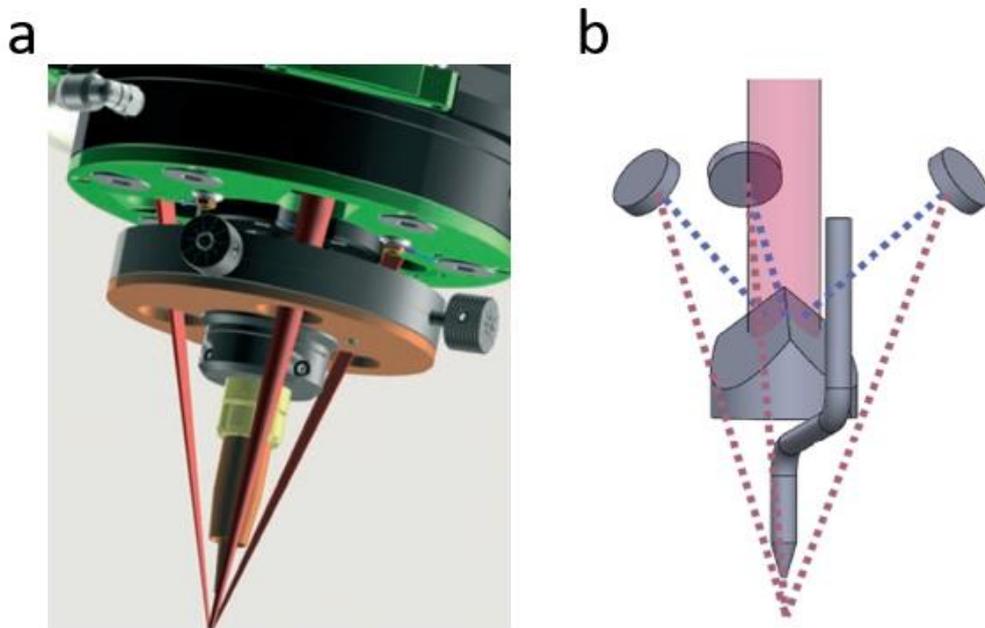


Figura 70. Cabezal de aporte desarrollado por Fraunhofer IWS. a) Boquilla de aporte de hilo con representación de los tres haces divididos y su enfoque en el hilo metálico; b) esquema del sistema óptico interior del cabezal. El prisma divide el haz láser principal en tres haces que vuelven a ser enfocados en un mismo punto gracias a tres espejos colocados alrededor.

Tal y como se puede ver en la caracterización del láser tras su paso por el cabezal mostrada en la Figura 71 y obtenida mediante el equipo PRIMES FocusMonitor, la forma del spot cambia notablemente ante una desviación de pocos milímetros, debido al ángulo de los láseres divididos respecto del eje normal a los planos mostrados.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

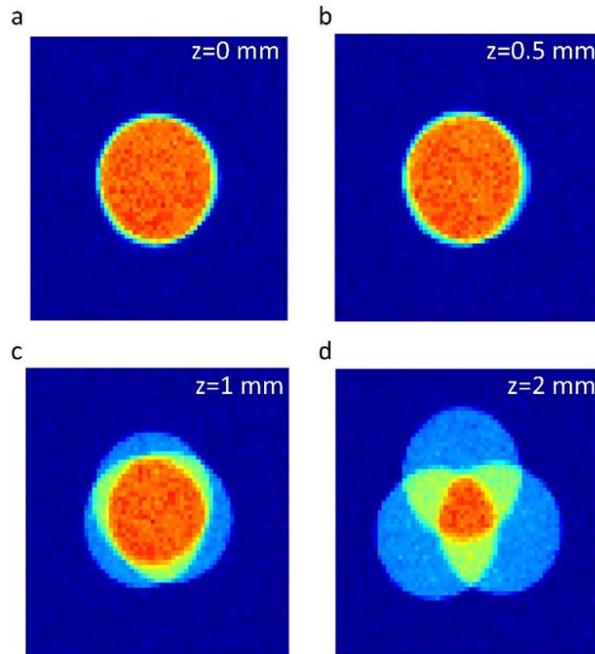


Figura 71. Caracterización del láser de proceso realizada con el equipo PRIMES FocusMonitor tras su paso por el cabezal de aporte de hilo coaxial desarrollado por Franhofer IWS.

La aplicación del control de altura descrito en el apartado 7.3 fue de nuevo testada mediante la construcción de diferentes hexaedros, empleando una estrategia de relleno tipo zig-zag y un perímetro externo. Se empleó hilo de acero 316L de 0,8 mm de diámetro con una velocidad de inserción de 3,5 m/min, dando lugar a una tasa de aporte de 0,83 kg/h. El sustrato consistió en placas de acero al carbono DIN C45E. Los parámetros de proceso son mostrados en la Tabla 7.

Potencia láser (W)	Velocidad de hilo (m/min)	Tasa de aporte de hilo (kg/h)	Caudal de gas de protección, argón (l/min)	Velocidad de avance de robot (mm/s)
1800	3,5	0,83	12	20

Tabla 7. Parámetros del proceso LMD-W empleados para el estudio de la influencia de la altura de capa teórica sobre la estabilidad del proceso.

Basado en una experimentación previa, la altura de capa fue conocida, con un valor aproximado de 0,9 mm, por lo que de nuevo se trató de fabricar los hexaedros con una altura de capa teórica inferior, 0,85 mm (Figura 72a) y superior, 0,93 mm (Figura 72b). Igualmente, se fabricó el hexaedro con la altura de capa similar al crecimiento real, 0,9 (Figura 72c) y con la aplicación del control de altura (Figura 72d).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

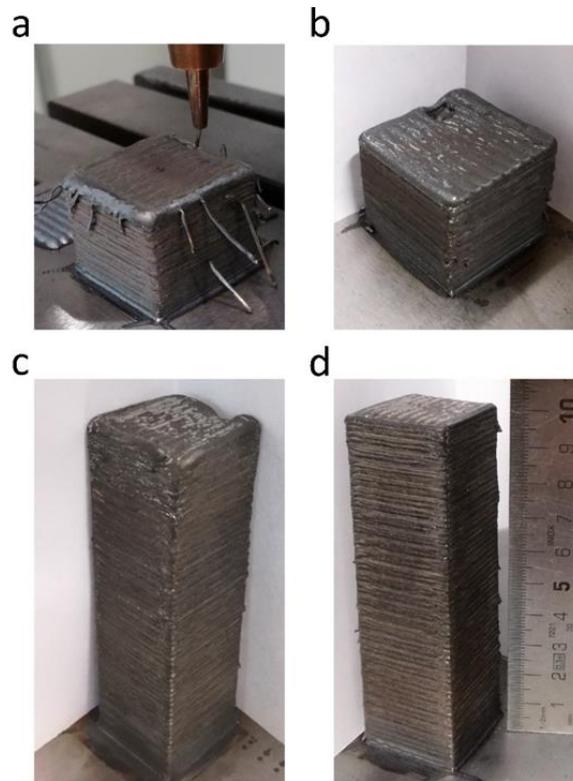


Figura 72. Hexaedros fabricados por LMD-W con diferentes alturas de capa teóricas. a) 0,85 mm de altura de capa teórica sin control; b) 0,93 mm de altura de capa teórica sin control; c) 0,9 mm de altura de capa teórica sin control; d) caso con la aplicación del control de altura.

La evolución de la altura de capa real y del error de altura en función de la altura de la pieza es mostrada en la Figura 73. El primer aspecto destacable es que la altura de capa real presentada en la Figura 73a presenta un valor similar, entorno a los 0,9 mm, para todas las piezas fabricadas. Esto corresponde a que la totalidad del material introducido en la pieza deba ser fundido para evitar el fallo del proceso, al contrario que en el caso del LMD-P.

En el caso de utilizar una altura de capa de 0,85 mm, es decir, inferior a la altura de capa real, tras el aporte de varias capas disminuyó la distancia entre boquilla y pieza dando lugar a un error de altura positivo y finalmente a enganches del hilo metálico en la pieza junto al fallo del proceso. Por otro lado, en el caso de una altura de capa de 0,93, superior a la altura de capa real, se produjo un goteo de material en la pieza lo que posteriormente dio lugar a un defecto irreversible. Empleando una altura de capa de 0,9 mm, similar a la altura de capa real, fue posible superar los 90 mm de altura, aunque con desviaciones de altura considerables en la superficie superior de la pieza que imposibilitaron continuar con la fabricación. Por último, con la

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

aplicación del control se consiguió un aporte totalmente plano y regular, alcanzando una altura de 100 mm.

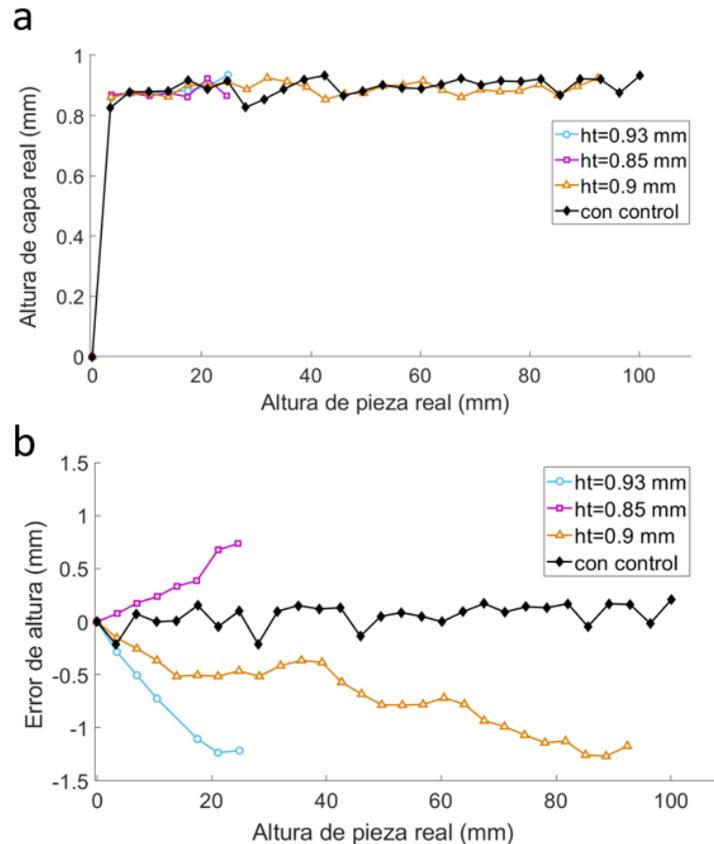


Figura 73. Altura de capa real para cada grupo de capas aportado y evolución del error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para el proceso LMD-W. a) Altura de capa real determinada por el escáner; b) error de altura.

La Tabla 8 resume la fabricación de las piezas y los resultados obtenidos. En este caso, el único caso en el que puede considerarse que la pieza se fabricó satisfactoriamente es aquel en el que se empleó el control de altura. Por otro lado, la eficiencia de atrapamiento de material fue cercana al 100% en todos los casos, por lo que la tasa de aporte de material fue aproximadamente igual a la tasa de material insertado en la zona de fusión.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Altura de capa teórica h_t (mm)	Resultado de la fabricación	Eficiencia de atrapamiento de material (%)	Tasa de aporte (kg/h)
0,85	Enganche de hilo	Cercano a 100	0,83
0,9	Superficie irregular		
0,93	Goteo de material		
Control de altura	Aporte adecuado		

Tabla 8. Resultado de las piezas fabricadas con diferentes alturas de capa teóricas y el caso de la aplicación del control de altura para el proceso LMD-W.

Con la excepción del caso en el que se aplicó el control de altura (Figura 72d), el proceso se volvió inestable tras el aporte de una serie de capas, dando lugar al fallo del proceso o a defectos irreversibles en la pieza. Es importante destacar que las alturas de capas introducidas como teóricas no difieren demasiado del crecimiento real de la pieza, lo que demuestra la importancia crítica de mantener una distancia adecuada entre boquilla de aporte y pieza. Por este motivo, parece fundamental el desarrollo del sistema de control de altura presentado en este trabajo, especialmente para el aporte de hilo metálico.

4.5. Conclusiones

En este capítulo se ha demostrado el efecto de un error de altura sobre los procesos LMD-P y LMD-W, y la importancia de mantener una distancia entre boquilla de aporte y pieza óptima.

En el caso de LMD-P, ha quedado demostrado cómo es posible fabricar piezas de manera estable incluso con una altura de capa teórica inferior a la altura de capa real. Esto ocurre, sin embargo, a costa de una reducción en la tasa de aporte de material y en la eficiencia del proceso. Por otro lado, la situación más desfavorable se da cuando la altura de capa teórica es mayor que la altura de capa real, ya que el error de altura tiende a crecer llegando incluso al fallo del proceso. Por último, ha quedado patente cómo un control de altura que actualice la posición del robot y la altura de capa teórica al valor del crecimiento real de la pieza minimiza el error de altura y maximiza la eficiencia del proceso.

En cuanto al proceso LMD-W, se ha probado una mayor importancia de mantener el error de altura en un valor pequeño tanto para valores positivos como negativos. Debido a que la práctica totalidad del material insertado es fundido, no existe la

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

situación de auto-compensación que sí puede darse en el caso del LMD-P. De esta forma, un error de altura negativo puede resultar en un goteo del material fundido sobre la pieza, mientras que un error de altura positivo puede provocar que el hilo quede enganchado a la pieza.

A modo de comparativa entre los procesos LMD-P y LMD-W se presenta la Figura 74, en la que se muestran la evolución de la altura de capa real y del error de altura en función de la altura de pieza real para las piezas fabricadas con los dos procesos. En primer lugar, se puede observar cómo en el caso del LMD-W la altura de capa real no varía de forma considerable a pesar del error de altura, al contrario que en el proceso LMD-P. Por otro lado, al comparar el error de altura en los dos procesos, puede verse que en el caso del LMD-P su valor puede tomar un rango considerablemente más ancho que en el caso del LMD-W.

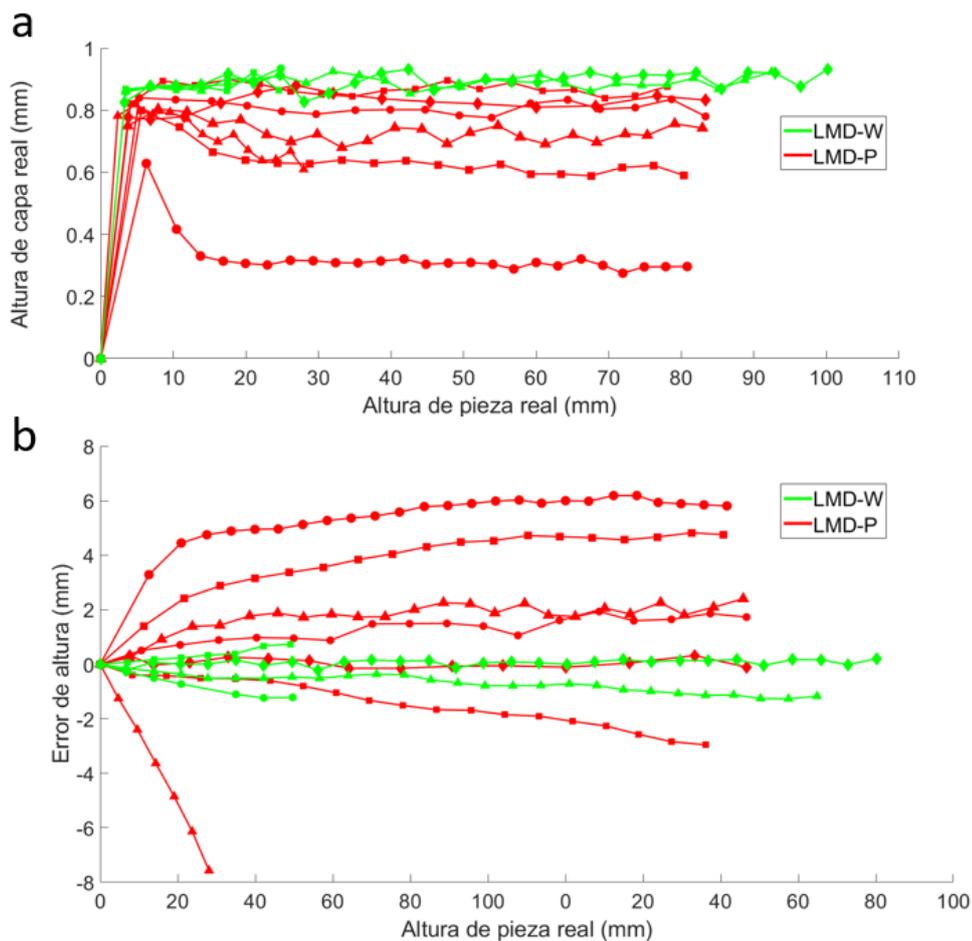


Figura 74. Comparativa de la altura de capa real y error de altura de capa en función de la altura de pieza real para los procesos LMD-P y LMD-W. a) Altura de capa real; b) error de altura.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Como conclusión, la Tabla 9 muestra unos valores aproximados de error de altura permitido para el proceso LMD-P y LMD-W. Estos valores pueden variar en función de los parámetros de proceso o del material aportado.

Error de altura permitido	LMD-P	LMD-W
Negativo	3-6 mm	0,5-2 mm
Positivo	Autocompensación (disminución de la eficiencia de atrapamiento de polvo)	0,5-2 mm

Tabla 9. Valores aproximados del error de altura permisible para los procesos LMD-P y LMD-W.

De esta forma, la necesidad de emplear un control de altura de la pieza es aún más crítica en el caso del LMD-W, especialmente para piezas de tamaño considerable.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Capítulo 5. Precisión en trayectoria robótica e influencia sobre el proceso LMD

5.1. Introducción

Los robots industriales cuentan con una repetitividad típicamente alrededor de 50 μm en su volumen de trabajo, mientras que los errores de posicionamiento en estático suelen tomar valores en un rango entre 0,1 mm y 0,5 mm para un volumen de trabajo de 1 m³. Por otro lado, el comportamiento dinámico de un robot depende del modelo dinámico integrado en el controlador robótico, encargado de introducir las consignas de posicionamiento de cada uno de los ejes para que el movimiento se realice con la mayor precisión posible, es decir, para disminuir el error en trayectoria.

La precisión con la que un sistema de movimiento ya sea un robot industrial, una máquina cartesiana u otro tipo de configuración, realiza una trayectoria puede afectar de diferentes formas al proceso LMD. Por un lado, las tolerancias con las que puede ser fabricada una pieza se ven afectadas tanto por el error de posicionamiento como por el error en trayectoria durante el aporte. Por otro lado, como se ha detallado en el Capítulo 4, una distancia inadecuada entre la pieza y la boquilla de aporte puede tener influencia sobre la estabilidad y eficiencia del proceso. Finalmente, la precisión del robot también es un aspecto destacable a la hora de aplicar correcciones de forma local sobre la altura de la pieza, ya que el control puede actuar en una localización distinta a la teórica.

Para minimizar los errores de trayectoria del robot, la programación robótica de las trayectorias permite variar la precisión con la que se alcanzan los puntos programados para así conseguir un movimiento con menores aceleraciones. Por otro lado, esto quiere decir que la trayectoria real del robot no necesariamente corresponde exactamente con la trayectoria programada. Por este motivo, en procesos como el LMD, en los que se busca precisión en la trayectoria con una velocidad constante, ambos aspectos pueden ser incompatibles por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre ambos.

En este capítulo se describen las transformaciones que sufre una trayectoria desde su concepción teórica hasta la trayectoria real que es trazada, en este caso por un robot industrial. Por otro lado, se realizarán ensayos experimentales en los que se analizará cómo puede afectar la programación de las trayectorias al resultado del proceso LMD.

5.2. Análisis de la precisión de trayectorias robóticas

Por lo general, las trayectorias de movimiento programadas inicialmente difieren en mayor o menor medida de las trayectorias trazadas por el robot. La Figura 75 muestra un esquema de la denominación de una trayectoria, en función de las transformaciones que sufre desde su concepción en un software de generación de trayectorias hasta el movimiento final realizado. El proceso de generación de una trayectoria de aporte comienza con la trayectoria teórica, en la imagen denominada como ideal. En esta trayectoria ideal, los movimientos son realizados con un posicionamiento y una velocidad ideales. En el caso de una trayectoria en esquina como la de la imagen superior, esto correspondería con alcanzar la esquina con precisión y realizar el cambio de dirección manteniendo una velocidad de avance constante.

Sin embargo, en la realidad, trazar la trayectoria ideal con una velocidad constante en la esquina supondría introducir una aceleración excesiva en el sistema de movimiento, lo que por otro lado de nuevo afectaría a la precisión con la que se realiza la trayectoria por una excesiva fuerza introducida en los accionamientos del robot que podrían excitar el sistema. Es por esto que la trayectoria ideal es modificada por parte de un controlador robótico, en este caso un ABB IRC5, para generar unas consignas de posicionamiento en los ejes del robot que permitan realizar la trayectoria con una precisión y suavidad suficiente sin que la velocidad del movimiento se vea excesivamente afectada. En el caso de la trayectoria de esquina de la Figura 75, la forma en la que el controlador actuaría para suavizar la trayectoria es mediante la introducción de un radio en la esquina. Cuanto mayor es este radio, más fácil es para el robot mantener una velocidad constante en la esquina, mientras que, para radios pequeños o inexistentes, el controlador tratará de reducir la velocidad del robot en la esquina para trazar la trayectoria con mayor precisión.

Finalmente, la trayectoria generada por el robot sigue siendo teórica ya que, aunque tenga en cuenta un modelo dinámico del robot incluido en el controlador, éste difiere en mayor o menor medida de la dinámica real del robot. Por este motivo, la trayectoria real del robot será la que en realidad se trace al ejecutar el programa en el robot.

Finalmente, existen alternativas para medir las diferentes fases de la trayectoria generada. Las trayectorias del robot pueden ser medidas a través de las consignas introducidas, en este caso, con una aplicación que registra el posicionamiento del

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

cabezal robótico y de los ejes del robot a través de sockets de ethernet. Por otro lado, para medir la trayectoria real del robot debe emplearse un sistema de medida externo cómo por ejemplo un laser tracker.

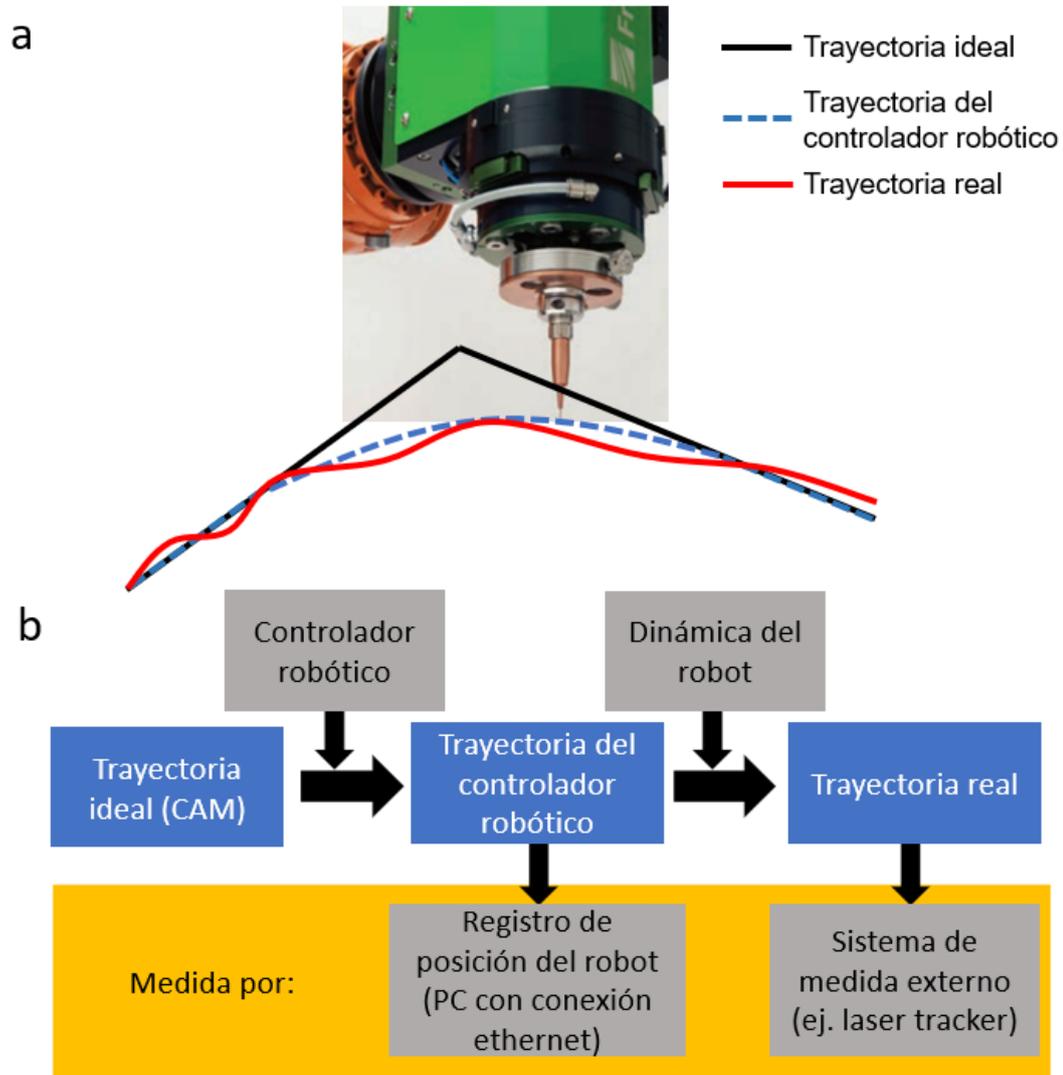


Figura 75. Esquema con trayectoria robótica y diferentes denominaciones utilizadas en función de las transformaciones realizadas hasta el movimiento real.

5.3. Estudio experimental de la precisión del movimiento en esquinas y efecto sobre el proceso LMD

La programación robótica permite definir la precisión con la que se alcanzan los puntos de la trayectoria. De esta forma, se genera una zona alrededor del punto programado en la que se produce el cambio de dirección de la trayectoria. En el caso de la Figura 76 se ilustran diferentes precisiones programadas para los puntos de la trayectoria p_2 y p_3 . En este caso, el robot es incluso capaz de readaptar las

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

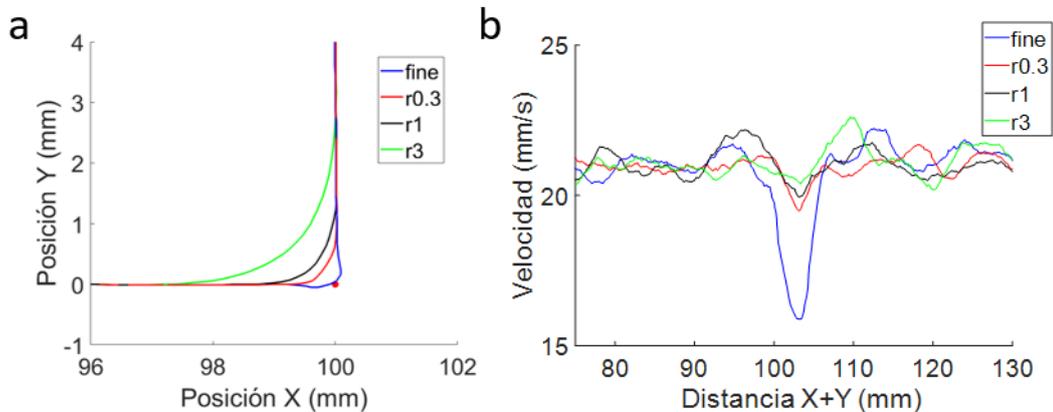


Figura 77. Posición y velocidad del robot en una trayectoria tipo esquina para diferentes precisiones de alcance del punto de la esquina (rojo). De mayor a menor precisión: fine, r0.3, r1, r3. a) Posición del robot en el plano horizontal; b) velocidad de avance del robot.

La diferente precisión de alcance del punto puede apreciarse en las piezas fabricadas por LMD-W de la Figura 78. Por un lado, en la Figura 78a el punto de la esquina se alcanza con una precisión de paso de 0,3 mm. Esto supone que el punto no necesariamente llega a alcanzarse, por lo que el aporte se realiza con un cierto radio en la esquina. Por el contrario, la esquina de la Figura 78b se alcanza con una precisión de punto de paro, lo que corresponde a que el robot se asegure de haber alcanzado el punto antes de realizar el movimiento al siguiente punto. Mientras que en este caso el punto de la esquina se alcance de manera más precisa, también se genera una acumulación de material en la esquina y una superficie superior más irregular.

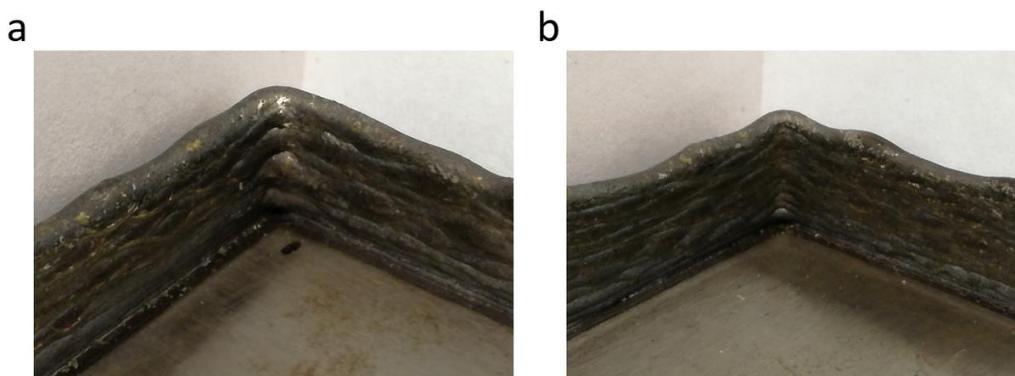


Figura 78. Resultado de precisión de alcance del punto en piezas fabricadas por LMD-W. a) Punto de paso con error de 0,3 mm; b) punto de paro.

Otro aspecto importante es cómo afecta la imprecisión de los movimientos del robot sobre la integridad de la pieza. En la Figura 79 se muestra el registro de posición

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

realizado sobre una trayectoria de aporte consistente en el patrón de relleno de dos capas consecutivas con un relleno tipo zig-zag y un perímetro externo. Aunque las trayectorias están programadas hasta la esquina de la pieza, alcanzar perfectamente este punto resultaría en una reducción excesiva de la velocidad del robot, resultando en un crecimiento excesivo en las esquinas de la pieza o incluso en el fallo del proceso por un enganche del hilo metálico. Por este motivo, la precisión de alcance del punto es reducida, resultando en unas trayectorias de esquina más redondeadas.

Por un lado, en la Figura 79a puede observarse la desviación de la trayectoria en la dirección vertical respecto de la altura programada, fruto de la propia dinámica del robot y de la interpolación de los ejes del robot por parte del controlador robótico. En la vista de alzado de la Figura 79b puede apreciarse una reducción de la velocidad en los cambios de dirección (Figura 79c), al mismo tiempo que la incapacidad de realizar de forma precisa las trayectorias de esquina.

En otros casos, este aspecto podría ser tratado desde la programación de las trayectorias, introduciendo esquinas redondeadas directamente, lo que permitiría unos movimientos precisos y con la velocidad de movimiento programada.

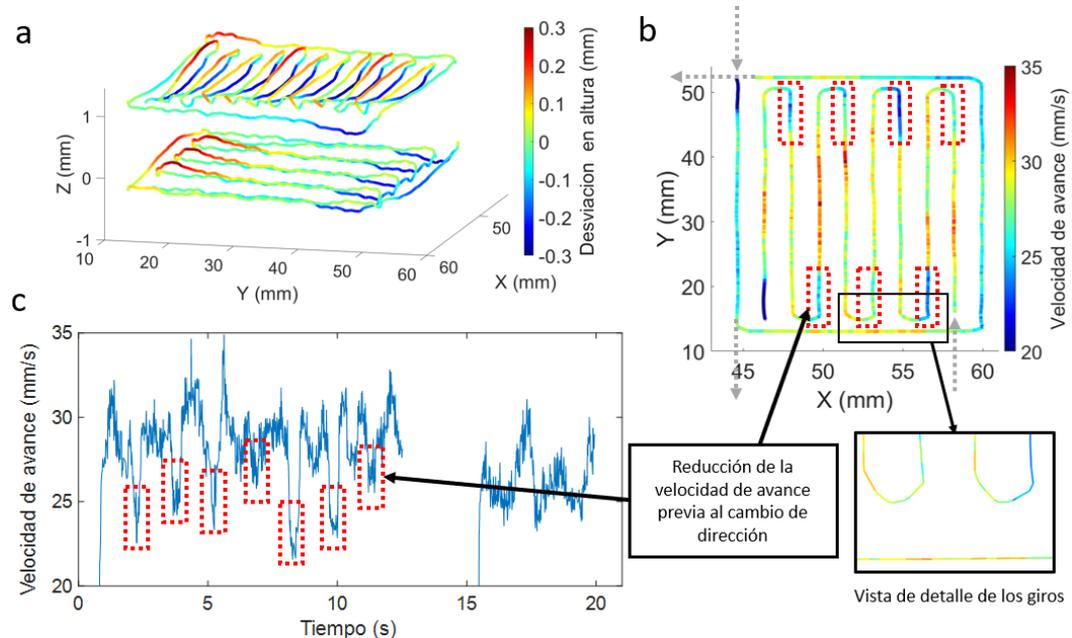


Figura 79. Registro de posición y velocidad en trayectoria de aporte con relleno tipo zig-zag y perímetro externo. a) Registro de posición de trayectoria de aporte de dos capas consecutivas; b) vista alzada de las trayectorias; c) registro de la velocidad en las trayectorias.

Para ilustrar de una mejor manera el efecto de la imprecisión de las trayectorias sobre la integridad de la pieza, en la Figura 80 se ilustra la trayectoria de aporte de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

una capa consistente en un relleno tipo zig-zag y un perímetro externo. La escala de colores representa la distancia de cada punto de la pieza al punto de la trayectoria más cercano. Mientras que lo deseable sería que las zonas intermedias entre las trayectorias tomen un valor constante, se observa como la distancia aumenta considerablemente en los cambios de dirección y en este caso, también en el inicio de la trayectoria de relleno en zig-zag.

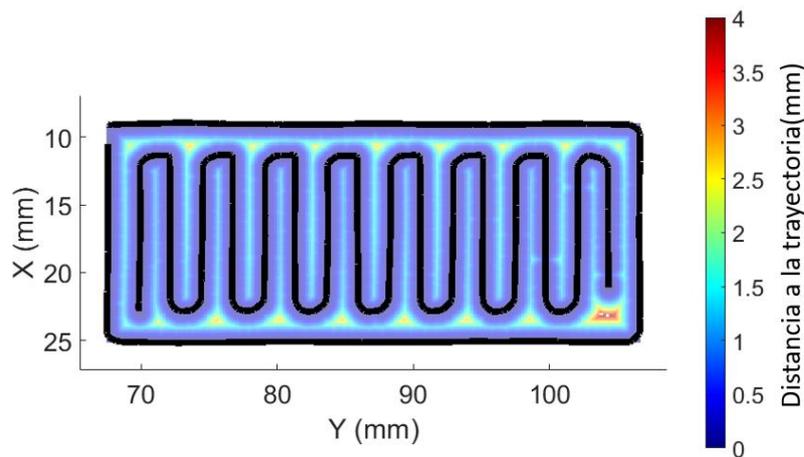


Figura 80. Trayectoria de relleno de pieza y cálculo del valor de solape en el interior de la pieza.

Una pieza fabricada por LMD-W con este tipo de patrón de relleno es mostrada en la Figura 81a. Esta pieza fue sometida a un ensayo no destructivo de Tomografía Computarizada (CT), evidenciando varios defectos en la unión entre el perímetro y el relleno, tanto en el caso del relleno en la dirección transversal (Figura 81b), como en longitudinal (Figura 81c). La distribución de estos defectos indica que estos se deben a la mencionada falta de precisión en los movimientos de esquina, que aumentan la distancia entre cordones adyacentes y producen zonas con un bajo solapamiento entre cordones.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

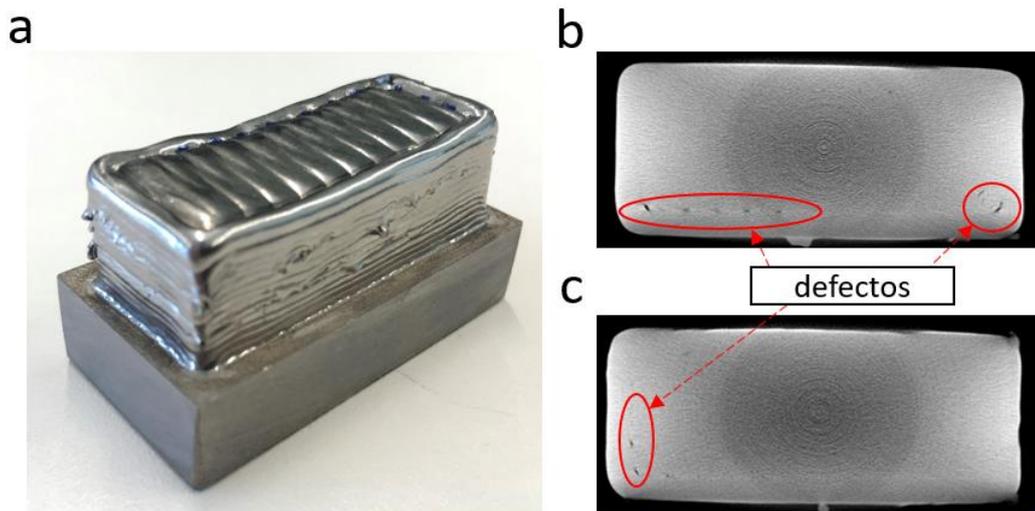


Figura 81. Pieza fabricada por LMD-W con patrón de relleno tipo zig-zag alternando la dirección y un perímetro externo. a) Pieza fabricada mediante LMD-W; b) CT de la pieza mostrando defectos en el relleno transversal; c) CT de la pieza mostrando defectos en el relleno longitudinal.

La limitación de precisión en trayectoria del robot debe ser, por otro lado, un aspecto a considerar a la hora de realizar correcciones sobre el proceso, ya que, por ejemplo, el punto en el que se obtiene el valor de la altura de crecimiento y se realizan las correcciones puede no corresponder exactamente con el punto real donde estas correcciones se aplican. Este tema volverá a ser discutido en el apartado 7.4, donde se realiza un control del crecimiento local de la pieza.

5.4. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado un breve análisis de la precisión de movimiento de un robot de fabricación mediante el proceso LMD. Para ello, se han descrito las diferentes etapas de una trayectoria y las modificaciones que sufre hasta lograr el movimiento real del robot.

Por otro lado, puesto que la posición y velocidad del robot son los parámetros críticos en el proceso LMD, estos han sido registrados para diferentes trayectorias y piezas fabricadas mediante este proceso. De este modo, ha quedado evidenciada la incapacidad de mantener unas trayectorias ideales, es decir, un posicionamiento preciso con una velocidad de movimiento y tasa de aporte constantes. El equilibrio entre estos dos aspectos es un aspecto clave a la hora de conseguir un proceso estable con una adecuada precisión geométrica e integridad de la pieza.

Por último, la precisión del movimiento del robot en trayectoria es un aspecto que puede influir a la hora de aplicar las correcciones en la zona precisa donde se da la

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

desviación de altura, aspecto que se trata de nuevo en el control de altura descrito en el apartado 7.4.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Capítulo 6. Digitalizado tridimensional y metodologías de calibración extrínseca del sistema de medida

6.1. Introducción

En el apartado 2.8 se ha justificado el empleo en este trabajo de escáneres de medida tridimensionales basados en la proyección de luz estructurada sobre la pieza a digitalizar. Las razones principales consisten en la rapidez a la hora de obtener una gran cantidad de medidas sin contacto, con una precisión suficiente para la mayoría de la pieza fabricadas mediante el proceso LMD.

Una de las grandes limitaciones con la que cuentan estos equipos comerciales es la incapacidad de realizar una medida in-situ de la geometría, ya que la elevada radiación emitida por el proceso imposibilita actualmente la realización de una medida precisa. Este aspecto, se soluciona, por lo general, realizando el escaneo de la pieza unos instantes después del aporte de material, de manera que el digitalizado de la geometría se intercala entre las etapas de fabricación.

Otra de las limitaciones que se puede encontrar a la hora de tratar de digitalizar una pieza es la dificultad que suponen algunos materiales y acabados superficiales para ser escaneados. Al tratarse de un método de proyección de luz basado en el contraste entre los diferentes patrones proyectados, algunas superficies brillantes pueden dificultar o imposibilitar la medida.

En este capítulo, se realiza un estudio de la influencia que el acabado superficial puede tener sobre la calidad del escaneo ante superficies del mismo material. El ejemplo planteado es totalmente extrapolable a la medida de piezas metálicas con diferentes acabados superficiales, como por ejemplo en el caso de las piezas con y sin óxido superficial fabricadas en esta tesis.

Por otro lado, el resultado de un escaneo mediante un escáner de luz estructurada consiste en una nube de puntos respecto a un sistema de coordenadas predeterminado por el escáner, o Scanner Coordinate System (SCS). El origen de este sistema de coordenadas puede estar posicionado en una de las cámaras del escáner, en la fuente de proyección de luz o en cualquier otro lugar, como por ejemplo en el centro del volumen de escaneado. De igual forma, la orientación de este sistema de coordenadas también está determinada por defecto.

Sin embargo, para obtener una relación directa entre la pieza digitalizada por el escáner y el resultado real de la fabricación es necesario transformar la nube de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

puntos adquirida a un sistema de coordenadas empleado en la fabricación de la pieza. El procedimiento empleado para determinar la transformación geométrica que es necesario aplicar a la nube de puntos original para transformarla al sistema de coordenadas de fabricación es denominado calibración extrínseca del escáner. Una vez determinada esta relación, es posible aplicarla a todos los posteriores escaneos, obteniendo unas nubes de puntos que puedan ser empleadas de forma efectiva durante el proceso de fabricación.

Para ello, en este capítulo se desarrollan diferentes metodologías de calibración extrínseca del escáner en función de la configuración de éste, ya sea en una posición fija o montado en el cabezal de aporte.

Para finalizar, además, se describen las aplicaciones que el digitalizado de la geometría puede tener en el proceso LMD y en las aplicaciones de postprocesado de las piezas aportadas

6.2. Estudio de la influencia del acabado superficial sobre la precisión del escaneo

Para analizar la influencia del acabado superficial sobre la precisión de la medida, en la Figura 82 se presenta el escaneo llevado a cabo sobre tres esferas patrón con diferentes acabados superficiales. En el caso de la esfera con acabado especular (Figura 82a), no fue posible realizar el escaneo. En la imagen se muestra la proyección del patrón de luz proyectado y el bajo o inexistente contraste obtenido sobre la superficie esférica. Por otro lado, en el caso de las esferas con acabados semi-especular (Figura 82b) y mate (Figura 82c) sí que fue posible realizar el escaneo de la superficie.

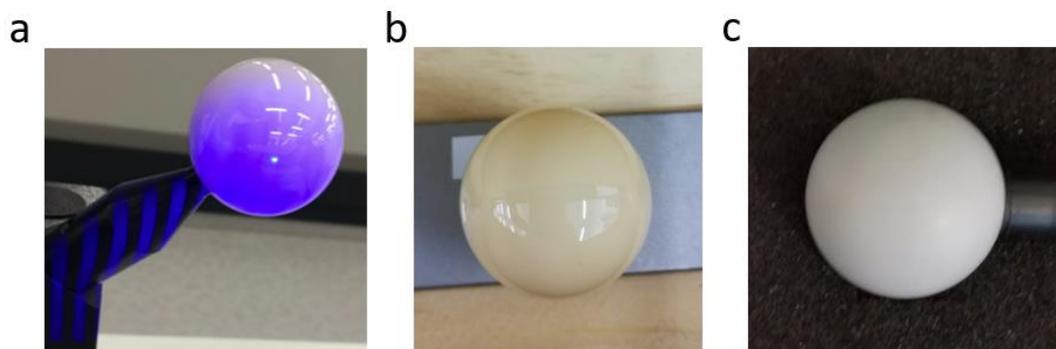


Figura 82. Esferas patrón con diferentes acabados superficiales. a) Acabado especular; b) acabado semi-especular; c) acabado mate.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En la Figura 83 se presenta la comparativa entre los escaneos de las esferas con acabados semi-especular y mate. En las imágenes superiores se muestra la comparativa entre el escaneo y el ajuste a la esfera teórica, mientras que en la parte inferior se encuentran los histogramas con estos mismos valores de desviación respecto de la superficie teórica. Cabe destacar que ambas esferas cuentan con unas tolerancias de fabricación un orden de magnitud inferior al de la precisión del escáner, por lo que las diferencias entre los escaneos de las dos esferas son debidas principalmente a las condiciones de escaneo. De esta forma, puede verse cómo la calidad del escaneo de la superficie mate es notablemente superior al de la esfera con acabado especular. Por este motivo, se concluye que las esferas con acabado mate han resultado ser idóneas para ser sometidas a un escaneo con proyección de luz estructurada.

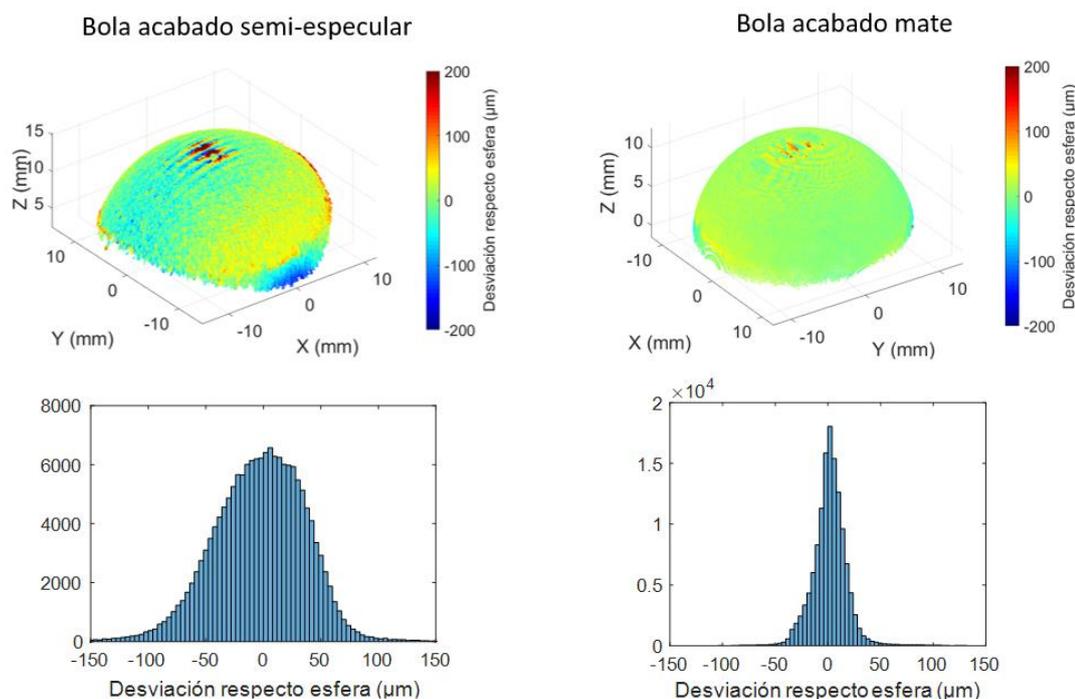


Figura 83. Comparativa de escaneos realizados sobre bolas patrón con acabado semi-especular y mate.

El acabado de algunos materiales metálicos aportados por LMD no presenta problemas a la hora de ser sometido a un escaneo, ya que el acabado de la superficie cuenta con una alta rugosidad. Esto ocurre para la totalidad de las piezas fabricadas mediante LMD-P, por las partículas de polvo adheridas a la superficie de la pieza, y para las piezas de LMD-W que cuentan con una capa de óxido alrededor de la superficie de la pieza. Sin embargo, algunas aleaciones metálicas aportadas

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

mediante LMD-W en atmosfera controlada, cuentan con un acabado brillante que, aunque no puede llegar a considerarse especular, presenta una reflexión ante la luz proyectada similar a la de una superficie especular. Este es el caso del Ti6Al4V empleado en varios de los ensayos realizados en esta tesis.

6.3. Metodología de calibración para configuración de escáner fijo

6.3.1. Transformación de la nube de puntos a un sistema de coordenadas usuario (UCS)

En la configuración en la que el escáner se coloca en una posición fija, normalmente el escáner se coloca a cierta distancia de la pieza y con un ángulo determinado respecto a ella. En el caso de monitorizar el crecimiento de la pieza, por lo general, ninguno de los ejes del SCS coincidirá con esta dirección. El primer método de calibración planteado consiste en obtener la transformación geométrica que permita transformar la nube de puntos adquirida de tal forma que una de sus componentes, en este caso la componente Z, coincida con la dirección de crecimiento de la pieza. El nuevo sistema de coordenadas en el que estarán referenciadas las nubes de puntos se ha denominado User Coordinate System (UCS), ya que será un sistema de coordenadas empleado únicamente por el usuario, no por la máquina o robot, y que permitirá monitorizar el crecimiento de la pieza.

En (1) se presenta la transformación de un punto obtenido en el SCS al UCS.

$$\begin{Bmatrix} p^{UCS} \\ 1 \end{Bmatrix} = T_{SCS}^{UCS} \cdot \begin{Bmatrix} p^{SCS} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

p^{UCS} es un punto del escaneo referido al UCS.

p^{SCS} es un punto del escaneo referido al SCS.

T_{SCS}^{UCS} es la matriz de transformación del SCS al UCS.

Para obtener la matriz de transformación T_{SCS}^{UCS} , previamente al comienzo de la fabricación se realiza un escaneo del substrato sobre el que se pretende realizar el aporte, y se ajusta un plano a la nube de puntos adquirida. Este escaneo inicial tiene como objetivo establecer la dirección de crecimiento de la pieza a partir de la nube de puntos adquirida de la superficie de la base de la fabricación, que en general tendrá una forma plana. Para ello, se seleccionan los puntos del escaneo correspondientes a la base del aporte y se realiza un análisis de las componentes

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

principales o Principal Component Analysis (PCA). Mediante el PCA se pretenden determinar los autovalores y autovectores de la de la matriz de covarianza C (2).

$$C \cdot V = V \cdot D \quad (2)$$

Donde:

C es la matriz de covarianza de dimensiones 3x3:

$$C = \begin{bmatrix} [b_1 - \bar{b}]^{SCS} & \dots & [b_i - \bar{b}]^{SCS} & \dots & [b_n - \bar{b}]^{SCS} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ [b_1 - \bar{b}]^{SCS} & \dots & [b_i - \bar{b}]^{SCS} & \dots & [b_n - \bar{b}]^{SCS} \end{bmatrix}^T$$

V es la matriz de dimensiones 3x3 cuyas columnas son los autovectores.

D es la matriz diagonal de dimensiones 3x3 con los autovalores en la diagonal principal.

$[b_i]^{SCS}$ es la matriz de 3x1 con las coordenadas del punto i escaneado en la base, referido al SCS.

$[\bar{b}]^{SCS}$ es un vector de 3x1 con los valores medios de las coordenadas de los puntos escaneados en la base, referidos al SCS.

n es el número de puntos escaneados en la base.

La base del UCS está compuesta por los tres autovectores de la matriz V . El autovector correspondiente al menor autovalor representa el vector normal al plano de ajuste a la nube de puntos, que será usado como componente Z del UCS y como dirección de crecimiento de la pieza. A partir de la matriz V y $[\bar{b}]^{SCS}$ es posible componer la matriz de transformación T_{SCS}^{UCS} , del SCS al UCS (3).

$$T_{SCS}^{UCS} = [T_{UCS}^{SCS}]^{-1} = \begin{bmatrix} V & [\bar{b}]^{SCS} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

Esta matriz de transformación es posteriormente aplicada en (1) a todos los escaneos para referir las nubes de puntos al UCS en lugar de al SCS.

En la Figura 84a se ilustra la nube de puntos de la base del escaneo representada respecto del SCS. Además, es posible visualizar el sistema de coordenadas UCS calculado para la nube de puntos adquirida. Por otro lado, la Figura 84b muestra la

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

nube de puntos respecto del UCS, una vez aplicada la transformación. Como puede observarse, el eje Z de este sistema de coordenadas, en color amarillo, es normal a la superficie y representará la dirección de crecimiento en los posteriores escaneos sobre la pieza en su etapa de fabricación.

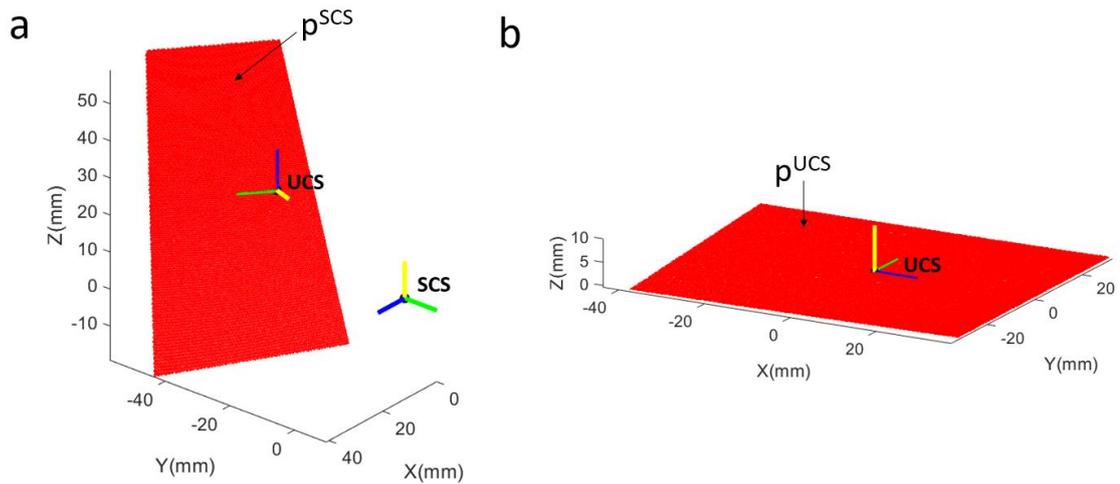


Figura 84. Proceso de referenciación de la nube de puntos para determinar la dirección de crecimiento de la pieza. a) Nube de puntos de la base del aporte referenciada al sistema de coordenadas del escáner (SCS); b) nube de puntos de la base del aporte referenciada al sistema de coordenadas usuario (UCS).

Finalmente, en la Figura 85 se presenta un escaneo llevado a cabo sobre una pieza en su etapa de fabricación, mostrando sus coordenadas respecto del UCS después de aplicar la transformación de (1).

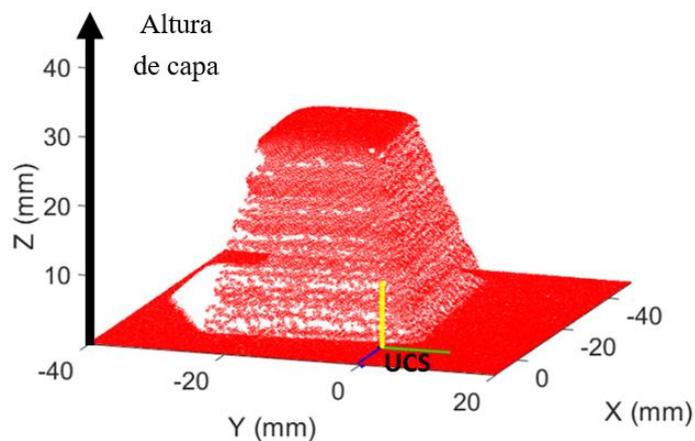


Figura 85. Nube de puntos adquirida en la fabricación de una pieza, referenciada al sistema de coordenadas UCS. La dirección de crecimiento de la pieza coincide con el eje Z (amarillo) del UCS.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Puesto que el valor aproximado del crecimiento de la pieza es normalmente conocido, la búsqueda de los puntos de la última capa puede reducirse a un volumen alrededor del crecimiento teórico de la pieza (Figura 86). De la misma manera, puede establecerse un volumen de búsqueda para los puntos pertenecientes a la base de la fabricación. Esto elimina la influencia de un posible movimiento del escáner durante la fabricación y limita la determinación de la altura de la pieza a los puntos cercanos a la parte superior de esta.

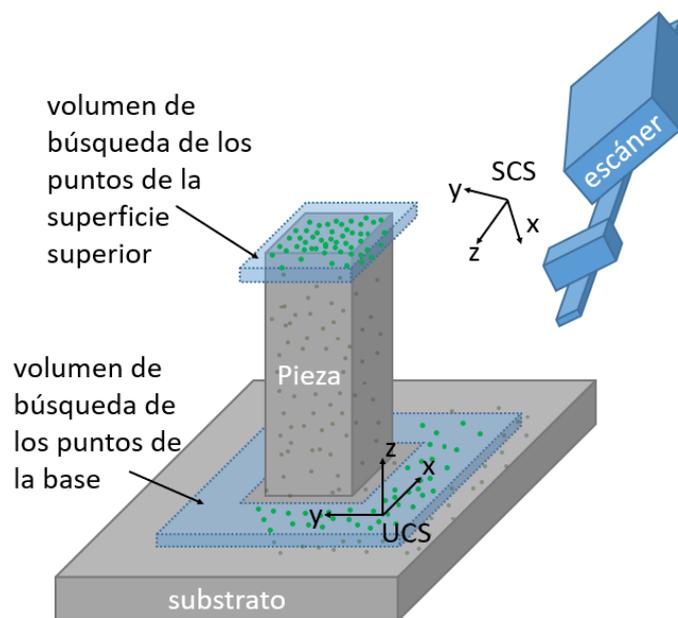


Figura 86. Obtención de los puntos de la base y de la superficie superior de la pieza para la determinación del sistema de coordenadas UCS y obtención de la altura de la pieza.

Este método de calibración ofrece una solución sencilla para monitorizar la altura de una pieza fabricada respecto del plano base del sustrato empleado para la fabricación. Además de ser una solución rápida de aplicar ya que únicamente requiere de un escaneo inicial, no es necesario el empleo de patrones físicos de calibración. Por otro lado, mientras que el origen de coordenadas del UCS está colocado sobre la superficie del sustrato, tanto su colocación dentro de este plano o la orientación de las componentes X e Y del UCS están determinadas de una manera arbitraria. Es por ello que esta calibración es útil únicamente para monitorizar el crecimiento de la capa completa de forma global, por ejemplo, mediante el cálculo de la altura media, y no sea apropiado para corregir desviaciones locales en la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En la Figura 87a se muestra la nube de puntos contenida en el volumen de búsqueda de la parte superior de una pieza. La escala de colores indica la desviación de altura respecto de la altura teórica de pieza que se esperaba alcanzar tras el aporte del grupo de capas correspondiente. Para la determinación de la altura de la pieza se toma como referencia el histograma de la Figura 87b, en el que se muestran la media y la moda de las alturas de los puntos en la dirección del crecimiento.

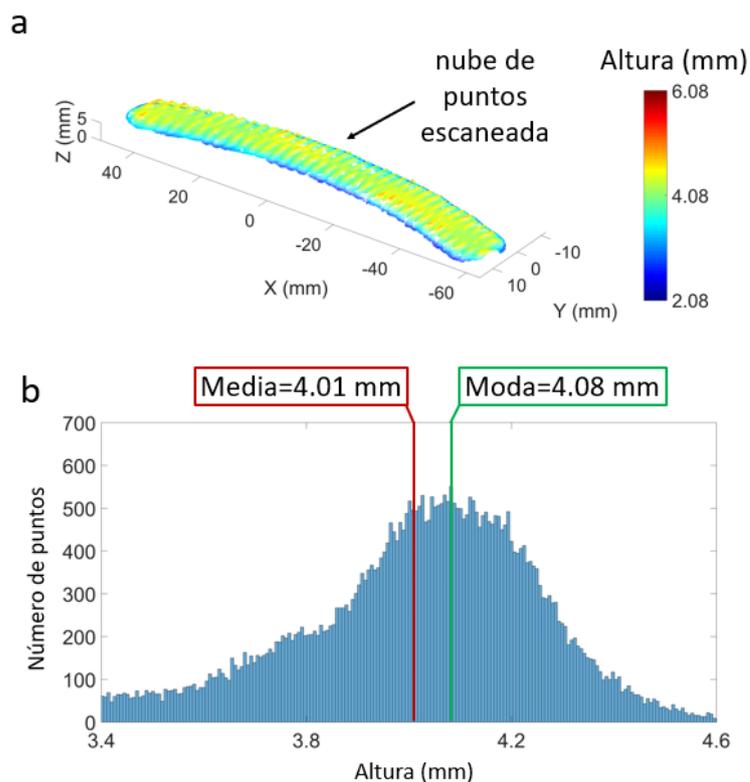


Figura 87. Determinación de la altura de la pieza: a) Nube de puntos de la parte superior de la pieza; b) histograma con la altura de los puntos indicando la media y la moda de las alturas.

6.3.2. Transformación de la nube de puntos a un sistema de coordenadas máquina (MCS)

En el caso de requerir un control de la geometría mientras esta está siendo fabricada o de querer aplicar correcciones en zonas concretas, es necesario que las nubes de puntos obtenidas estén referenciadas en el sistema de coordenadas de fabricación de la máquina o robot. Por lo tanto, en lugar de emplear un sistema de coordenadas usuario, UCS, en este caso la transformación deberá realizarse al sistema de coordenadas máquina, MCS. De forma análoga al caso anterior, la transformación de un punto referido en el SCS al MCS se presenta en (4).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

$$\begin{Bmatrix} p^{MCS} \\ 1 \end{Bmatrix} = T_{SCS}^{MCS} \cdot \begin{Bmatrix} p^{SCS} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Donde:

p^{MCS} es un punto del escaneo referido al MCS.

p^{SCS} es un punto del escaneo referido al SCS.

T_{SCS}^{MCS} es la matriz de transformación del SCS al MCS.

En este caso, para realizar la calibración se emplea una placa de calibración con dianas como la que se muestra en la Figura 88. Esta placa de calibración cuenta con un sistema de coordenadas en una de sus esquinas, denominado Object Coordinate System (OCS), y las coordenadas de todas las dianas respecto del OCS son conocidas. Para obtener la matriz de transformación T_{SCS}^{MCS} , que transforma las coordenadas del SCS al MCS, en primer lugar, ésta se descompone en dos matrices (5).

$$T_{SCS}^{MCS} = T_{SCS}^{OCS} \cdot T_{OCS}^{MCS} \quad (5)$$

Donde:

T_{SCS}^{OCS} es la matriz de transformación del SCS al OCS.

T_{OCS}^{MCS} es la matriz de transformación del OCS al MCS.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

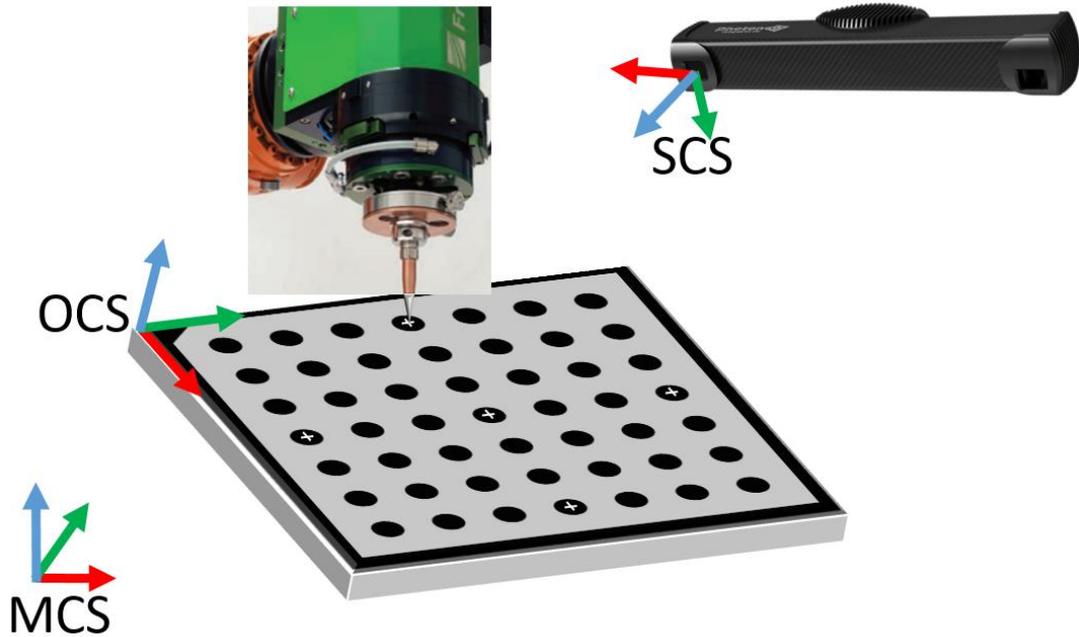


Figura 88. Sistemas de coordenadas empleados en la calibración del sistema de medida y proceso de palpado del plato de calibración con el cabezal de aporte.

La matriz de transformación T_{SCS}^{OCS} se resuelve detectando mediante técnicas de visión la posición de las dianas negras en el plato de calibración y establece la pose del sistema de coordenadas SCS respecto del OCS. Por otro lado, la matriz de transformación T_{OCS}^{MCS} se obtiene palpando un número n de puntos con una punta fijada en la boquilla del cabezal y resolviendo el problema de mínimos cuadrados planteado en (6).

$$\min \left(\sum_{i=1}^n \| R_{OCS}^{MCS} \cdot P^{OCS} + t_{OCS}^{MCS} - P^{MCS} \|^2 \right) \quad (6)$$

donde:

P^{MCS} es una matriz de $3 \times n$ con las coordenadas de n puntos palpados con el robot respecto del MCS.

P^{OCS} es una matriz de $3 \times n$ con las coordenadas de los n puntos respecto del OCS.

R_{OCS}^{MCS} es la matriz de rotación de 3×3 del OCS al MCS

t_{OCS}^{MCS} es el vector de translación de 3×1 del OCS al MCS

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

El problema planteado en (6) es resuelto mediante el algoritmo desarrollado por Horn en [133], de tal forma que se obtiene como resultado la matriz de transformación T_{OCS}^{MCS} , compuesta según (7).

$$T_{OCS}^{MCS} = \begin{bmatrix} R_{OCS}^{MCS} & t_{OCS}^{MCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Finalmente, T_{OCS}^{MCS} se emplea para transformar cada punto escaneado del SCS al MCS mediante (4). Así, las coordenadas de la nube de puntos escaneada son referenciadas al sistema de coordenadas máquina (MCS) pudiendo no solo controlar el crecimiento de la pieza sino también las desviaciones en las tres dimensiones.

Aunque este método de calibración requiera de un patrón físico, el procedimiento de palpado de las referencias es rápido y únicamente es necesario realizarlo cuando se cambie la posición del escáner. Por otro lado, aunque se tomen varios puntos de palpado para disminuir el error de calibración, la medida cuenta con la incertidumbre introducida por los errores de palpado, error de posicionamiento del robot, errores de construcción en el patrón de calibración o el error debido a la resolución de la cámara del escáner a la hora de detectar la posición de las dianas.

6.4. Metodología de calibración para configuración de escáner montado en el cabezal de aporte

En el caso de la configuración del escáner en la que éste se monta en el cabezal de aporte, los sistemas de coordenadas SCS y MCS no cuentan con una relación geométrica fija, ya que el escaneo puede realizarse desde diferentes posiciones y orientaciones del cabezal robótico.

Sin embargo, del mismo modo que en el apartado 6.3.2, el objetivo consiste en determinar la relación geométrica que permita transformar las coordenadas de los puntos escaneados del sistema de coordenadas del escáner (SCS) al sistema de coordenadas de trabajo del robot (MCS) (8).

$$\begin{Bmatrix} p^{MCS} \\ 1 \end{Bmatrix} = T_{SCS}^{MCS} \cdot \begin{Bmatrix} p^{SCS} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Para resolver (8), puesto que el término T_{SCS}^{MCS} varía para cada posición de escaneo, este se divide en dos nuevos términos como se puede observar en (9).

$$\begin{Bmatrix} p^{MCS} \\ 1 \end{Bmatrix} = T_{TCS}^{MCS} \cdot T_{SCS}^{TCS} \cdot \begin{Bmatrix} p^{SCS} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En la Figura 89a puede observarse el montaje del escáner sobre el cabezal junto con los sistemas de coordenadas necesarios para realizar la calibración.

Además del SCS y el MCS, se ilustra por un lado el sistema de coordenadas de un patrón de calibración (OCS). Para este método de calibración se fabricó un patrón de calibración consistente en cuatro esferas, colocadas de tal forma que los centros de estas determinen la posición y orientación del sistema de coordenadas OCS. Para eliminar la simetría, se colocó una de las esferas a diferente altura respecto a las otras tres y se emplearon diferentes distancias entre los centros de cada esfera.

Por otro lado, el último sistema de coordenadas representado en la Figura 89a consiste en el TCS, correspondiente al sistema de coordenadas del Tool Center Point (TCP) del robot. El TCS se determina mediante la transformación geométrica del sistema de coordenadas del último eje del robot. Normalmente, este sistema de coordenadas es el empleado para determinar la posición y orientación del robot cuando se introduce una consigna de posicionamiento. Sin embargo, para la calibración desarrollada en este trabajo, la colocación del TCP es indiferente ya que, como quedará patente posteriormente, consiste en un método realizado sin necesidad de palpado del patrón de calibración con el robot.

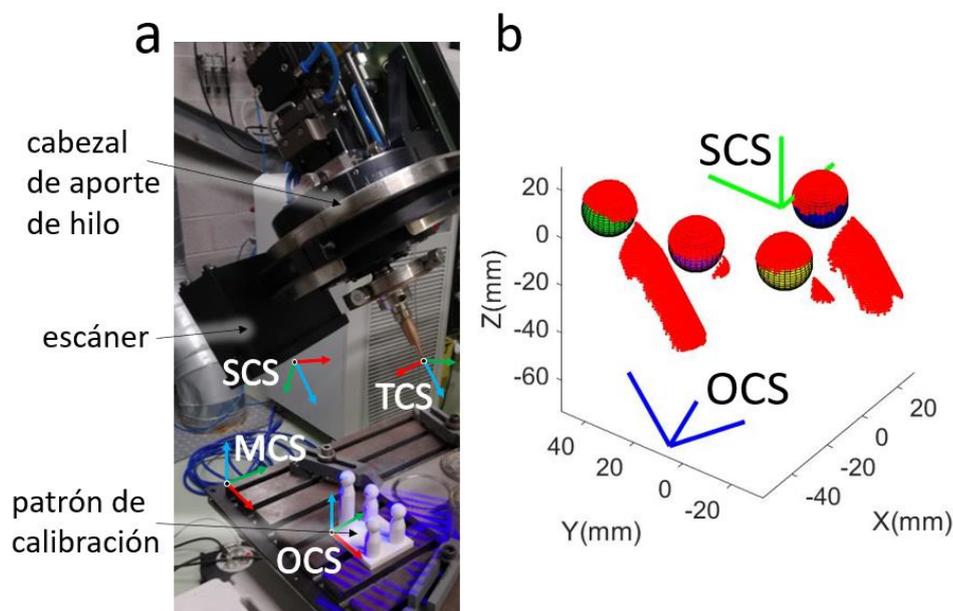


Figura 89. a) Representación de los sistemas de coordenadas involucrados en la calibración hand-eye mediante el método Tsai-Lenz; b) ajuste de esferas a la nube de puntos del escaneo del patrón de calibración.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Volviendo a (9), la matriz de transformación T_{TCS}^{MCS} corresponde con la posición y orientación del TCS respecto del MCS, por lo que es conocida en todo momento, ya que define el posicionamiento del cabezal de aporte en la máquina o celda robótica.

Por otro lado, la matriz de transformación T_{SCS}^{TCS} representa en la relación geométrica entre SCS y el TCS, únicamente dependiente del montaje del sistema de anclaje del escáner en el cabezal de aporte, y consiste en el término que debe resolverse en la calibración.

Para obtener T_{SCS}^{TCS} , en lugar de emplear (9) se sustituyen los puntos escaneados por el sistema de coordenadas (OCS) del patrón de calibración, dando lugar a (10).

$$T_{OCS}^{MCS} = T_{TCS}^{MCS} \cdot T_{SCS}^{TCS} \cdot T_{OCS}^{SCS} \quad (10)$$

En este caso, la matriz de transformación T_{OCS}^{MCS} viene definida por la colocación del patrón de calibración en el MCS mientras que T_{OCS}^{SCS} , consistiría en la relación entre el sistema de coordenadas del escáner y del patrón de calibración, por lo que obviamente también varía para cada posición de escaneo.

Para resolver (10) se emplea el método de calibración hand-eye denominado Tsai-Lenz [134]. El objetivo de una calibración hand-eye consiste en determinar la relación entre el brazo robótico (hand) y el escáner de medida (eye), en este caso, la matriz de transformación T_{SCS}^{TCS} . Este método tiene como entradas las matrices de transformación T_{TCS}^{MCS} y T_{OCS}^{SCS} y resuelve las otras dos transformaciones, T_{OCS}^{MCS} y T_{SCS}^{TCS} . Para ello, es necesario introducir escaneos sobre el patrón de calibración desde diferentes posiciones y orientaciones del robot.

Puesto que, como se ha mencionado anteriormente, T_{TCS}^{MCS} es conocido en todo momento, únicamente queda determinar la matriz de transformación T_{OCS}^{SCS} para cada posición de escaneo del robot. En este caso, para cada posición, el patrón de calibración fue escaneado y los centros de las cuatro esferas fueron detectados mediante ajuste de mínimos cuadrados a sus superficies (Figura 89b), dando lugar a un problema de mínimos cuadrados (11) idéntico al del apartado anterior.

$$\min \left(\sum_{i=1}^n \| R_{OCS}^{SCS} \cdot P^{OCS} + t_{OCS}^{SCS} - P^{SCS} \|^2 \right) \quad (11)$$

donde:

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

P^{SCS} es una matriz de 3×4 con las coordenadas de los centros de las cuatro esferas respecto del SCS.

P^{OCS} es una matriz de 3×4 con las coordenadas de los centros de las cuatro esferas respecto del OCS.

R_{OCS}^{SCS} es la matriz de rotación de 3×3 del OCS al SCS

t_{OCS}^{SCS} es el vector de translación de 3×1 del OCS al SCS

De nuevo, el problema de (11) fue resuelto mediante el algoritmo desarrollado por Horn [133], dando lugar a la matriz de transformación T_{OCS}^{SCS} (12).

$$T_{OCS}^{SCS} = \begin{bmatrix} R_{OCS}^{SCS} & t_{OCS}^{SCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Posteriormente, se computa (10) mediante el método Tsai-Lenz, dando como resultado de la calibración la matriz de transformación T_{SCS}^{TCS} . Aunque no es empleada posteriormente, el método devuelve también T_{OCS}^{MCS} , o la posición del objeto de calibración en el MCS. Esto evidencia que para este método de calibración la colocación del objeto de calibración es indiferente y no es necesario conocerla de antemano para la resolución del método.

La comprobación del método es mostrada en la Figura 90. En ella se representan los sistemas de coordenadas involucrados en el método de calibración para cada posición de escaneo. Como puede observarse, el sistema de coordenadas OCS es calculado para cada posición de escaneo mediante (10), resultando en un posicionamiento del objeto de calibración en el MCS coincidente para cada una de las poses del robot. Las flechas rojas indican las transformaciones necesarias para obtener la transformación del OCS al MCS, o, en otras palabras, el camino empleado para referenciar un punto obtenido en el SCS en el MCS.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

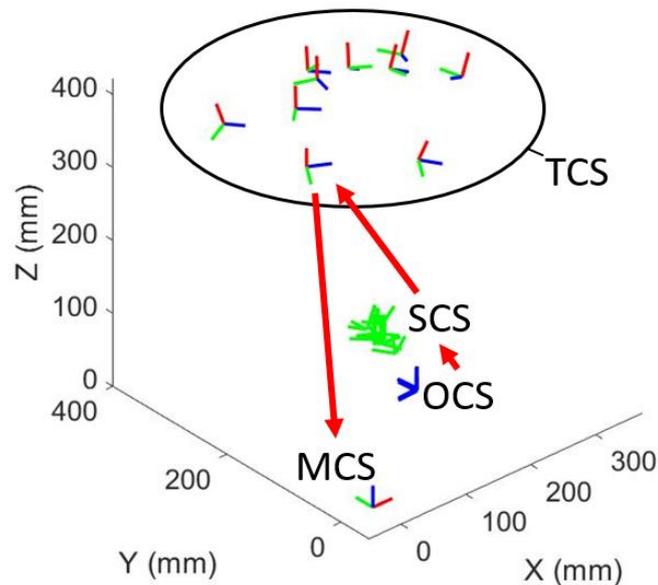


Figura 90. Validación del resultado de la calibración hand-eye, mostrando los sistemas de coordenadas en las diferentes posiciones del robot. Tras aplicar el resultado de la calibración el sistema de coordenadas del objeto, OCS, coincide para todas las poses de escaneo.

Tras la calibración, cada punto del escaneo es transformado del SCS al MCS por medio de (9). Como resultado de la calibración, la colocación del escáner en el cabezal es conocida, mediante T_{SCS}^{TCS} , por lo que únicamente es necesario introducir el posicionamiento del robot para la posición de escaneo empleada, T_{TCS}^{MCS} .

6.5. Aplicaciones de la digitalización tridimensional de la geometría

6.5.1. Comparativa de pieza fabricada contra geometría teórica en proceso
Los métodos de fabricación DED y en particular del LMD cuentan con la capacidad para generar piezas cercanas a la forma final o near-net-shape. Esto las convierte en una alternativa a métodos convencionales de fabricación basados en arranque de viruta. Sin embargo, el rugoso acabado superficial de las piezas fabricadas, así como las pobres tolerancias de fabricación provocan que existan diferencias entre la geometría teórica y la fabricación, en ocasiones del orden de milímetros. El alto aporte de energía introducido en la fabricación no hace sino potenciar este aspecto, ya que las piezas tienen a sufrir distorsiones geométricas al ser calentadas y después enfriadas rápidamente por acción del láser de proceso, especialmente en geometrías de gran tamaño. La forma de compensar estas desviaciones suele pasar por introducir ciertas creces en la pieza que posteriormente deben ser eliminadas con una operación de mecanizado posterior. Esto supone un alto sobrecoste provocado

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

por la necesidad de mayor cantidad de materia prima y de operaciones de mecanizado, especialmente en materiales caros y difíciles de mecanizar. Por ello, existe un interés creciente en controlar la geometría de las piezas durante sus etapas de fabricación, lo que incluye un control geométrico en el propio sistema de FA. Así, es posible detectar distorsiones geométricas tales que sea necesario desechar la pieza antes de su finalización. Por otro lado, es de especial utilidad para tratar de minimizar la cantidad de material necesario para construir la pieza final, y de este modo reducir el tiempo y coste de fabricación.

Un control en proceso de la geometría fabricada, por lo general, requiere que las coordenadas de los escaneos estén referenciadas al sistema de coordenadas del sistema de fabricación. Además, para obtener todos los detalles de la geometría, generalmente son necesarias varias posiciones de escaneo, por lo que para este caso lo más adecuado es emplear la configuración de escáner fijada en el cabezal de aporte junto con una calibración extrínseca como la descrita en el apartado 6.4.

En la Figura 91a se muestra una pieza cilíndrica fabricada mediante LMD-W. El material de partida consistió en hilo de titanio (Ti6Al4V) de 0,8 mm de diámetro. Tras la calibración y la fabricación de la pieza, la geometría resultante se escaneó desde diferentes posiciones del robot. La Figura 91b muestra una de estas posiciones en la que se realizó un escaneo del lateral exterior del cilindro. El posicionador en este caso fue empleado para rotar la pieza y lograr el posicionamiento relativo entre el escáner y la pieza.

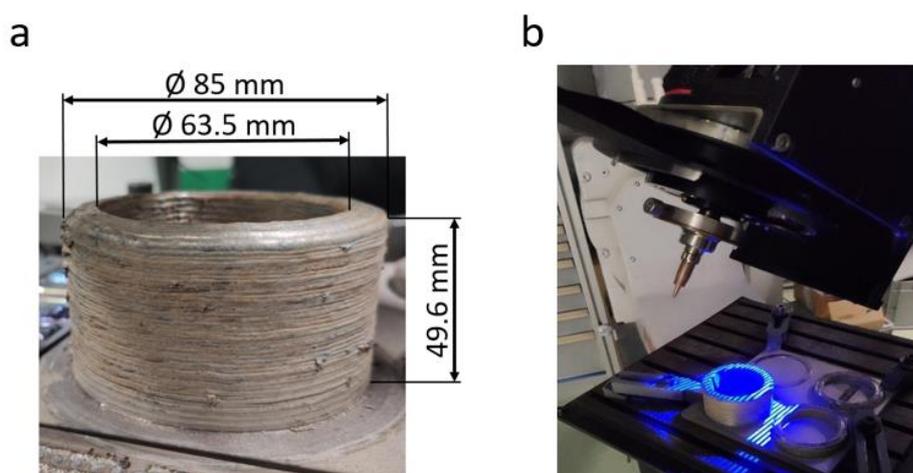


Figura 91. Digitalización de geometría mediante escáner basado en luz estructurada. a) Pieza cilíndrica fabricada mediante LMD con aporte de hilo de titanio Ti6Al4V; b) escaneo de pieza cilíndrica desde una de las posiciones del robot.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Como resultado de la calibración, las coordenadas de los puntos escaneados fueron automáticamente transformadas al sistema de coordenadas MCS, por lo que los diferentes escaneos de la pieza formaron la geometría completa sin necesidad de alineamientos adicionales. Sin embargo, los escaneos, una vez juntados en una única nube de puntos, fueron filtrados y reducidos para disminuir su tamaño y facilitar su manejo.

Por otro lado, en la Figura 92 se presenta la comparativa de la geometría escaneada contra el modelo CAD de la pieza. La escala de colores representa el valor de la desviación del escaneo respecto de la geometría teórica. Esta información puede resultar especialmente útil para determinar la distorsión de una pieza debido a los efectos térmicos durante su proceso de fabricación, o para determinar el exceso de material que debe ser eliminado en una etapa de mecanizado posterior. Es importante destacar que, para alcanzar la geometría final de la pieza tras el mecanizado, es necesario que la superficie completa de la pieza tenga un valor de desviación respecto del CAD positivo, mientras que, por otro lado, es de interés que este valor sea lo menor posible para reducir el post-procesado.

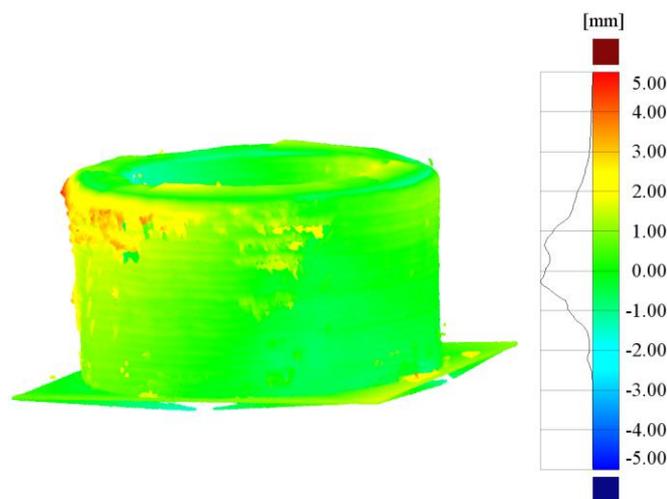


Figura 92. Comparativa contra CAD de la pieza escaneada frente al modelo CAD de la pieza, mostrando las desviaciones geométricas.

6.5.2. Determinación del crecimiento de la pieza

En otros casos la medida tridimensional puede servir únicamente para asegurar el correcto crecimiento de la pieza y evitar el fallo de la fabricación. Este es el caso de la aplicación de un control de altura, en el que el objetivo consiste en tratar de mantener constante la distancia entre la pieza y la boquilla de aporte.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

La Figura 93 muestra de nuevo la nube de puntos de la pieza de la Figura 91a, obtenida escaneando la pieza desde diferentes posiciones. La escala de colores de la figura superior muestra el crecimiento de la pieza respecto de la base de la fabricación, mientras que la escala de colores de la imagen inferior corresponde con la desviación de altura de la pieza respecto de la altura media de la capa. Esta información es la base para el desarrollo de las metodologías de control de altura desarrolladas en el Capítulo 7.

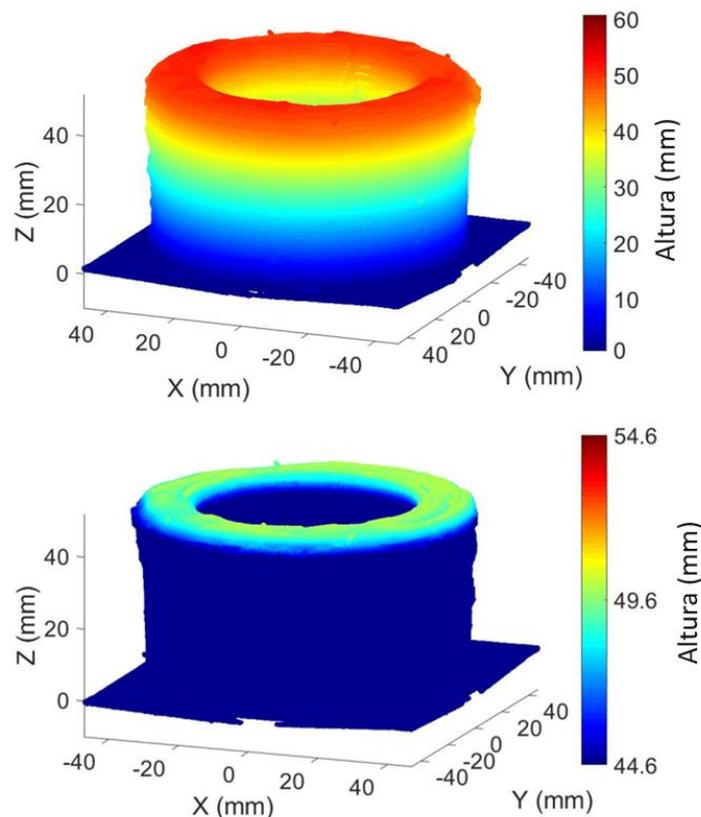


Figura 93. Nube de puntos obtenida tras juntar los escaneos desde diferentes posiciones, indicando la altura obtenida en la pieza con dos escalas de color diferentes. Arriba, altura total de la pieza desde la base de la fabricación; abajo, desviación de altura respecto de la altura media de la superficie superior de la pieza.

Para los casos en los que la medida únicamente se obtiene para la aplicación de un control de altura, es suficiente con digitalizar la superficie superior de la pieza, de cara a medir su crecimiento.

En la Figura 94a se presenta una pieza similar a la anterior pero fabricada en una atmosfera libre de oxígeno. Debido a las altas temperaturas alcanzadas en la fabricación de las piezas, estas son susceptibles de sufrir oxidación, por lo que para

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

obtener una pieza con un contenido de oxígeno controlado es necesario generar una atmosfera libre de este elemento. En este caso, se empleó la cámara de atmosfera inerte mostrada en la Figura 50b, en la que se insertó un flujo continuo de argón.

El resultado es una superficie sin óxido con un acabado superficial brillante, lo que, por otro lado, supone una dificultad a la hora de ser sometida a un escaneado. Por lo tanto, para poder realizar el escaneo de la capa superior fue necesario optimizar los parámetros de escaneo. Para ello, es beneficioso emplear la máxima resolución disponible en el escáner (entre 20 μm y 100 μm en función de la posición en el volumen de medida), reducir la iluminación ambiental y emplear tiempo de exposición prolongados en las cámaras que incorpora el escáner.

El resultado es la nube de puntos de la capa superior mostrada en la Figura 94b. Los valores de la escala de colores corresponden con el crecimiento de la pieza respecto del substrato y su desviación respecto de la altura de pieza teórica.

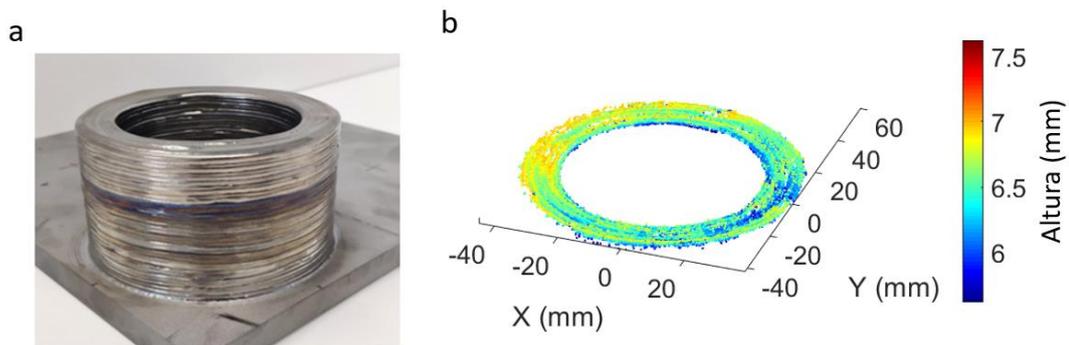


Figura 94. Digitalizado de superficie superior de pieza. a) Pieza de titanio cilíndrica fabricada en atmosfera libre de oxígeno; b) nube de puntos de la superficie superior de la pieza.

En el caso de piezas que ocupen un volumen mayor que el volumen de captura del escáner, pueden ser necesarios varias posiciones de escaneo para digitalizar la superficie superior completamente. Este es el caso de la pieza de titanio fabricada mediante el proceso LMD-W de la Figura 95.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

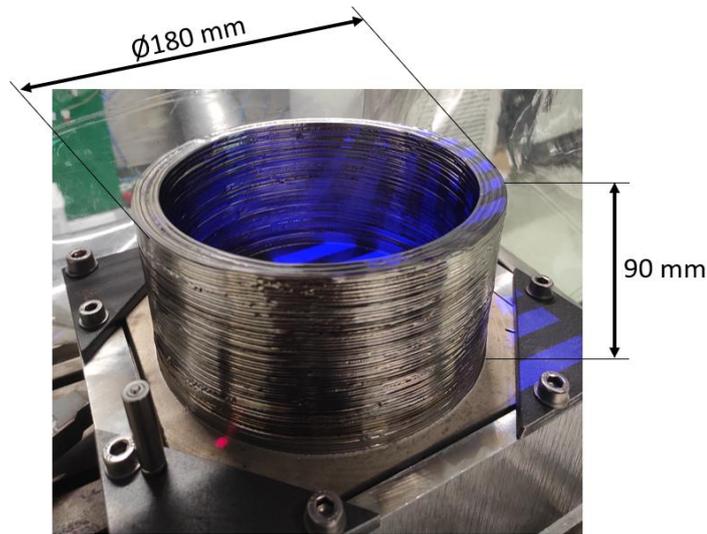


Figura 95. Cilindro de titanio fabricado por LMD-W junto con sus dimensiones.

En la Figura 96a se muestra el resultado de la fabricación tras aportar las primeras capas de la pieza. Como se ve en la Figura 96b, el volumen de escaneo tan solo abarca una pequeña parte de la pieza, por lo que fueron necesarias varias posiciones de escaneo para obtener la superficie completa.

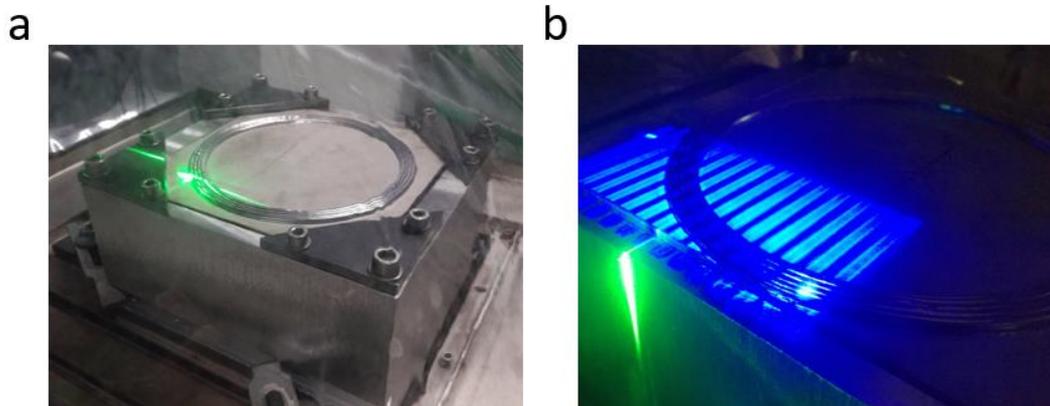


Figura 96. Digitalizado de pieza de mediano tamaño. a) Pieza tras el aporte de las primeras capas; b) escaneo individual de una parte de la pieza.

Tras el cosido de las nubes de puntos se les aplicó un filtrado para eliminar parte del ruido de la medida y se redujo la resolución de la nube resultante para facilitar su manejo y reducir el tamaño de almacenamiento de los archivos. El resultado de los escaneos tras el aporte de varios grupos de capas es mostrado en la Figura 97, donde la escala de colores representa la desviación de altura de cada grupo de capas respecto a su altura de capa teórica.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

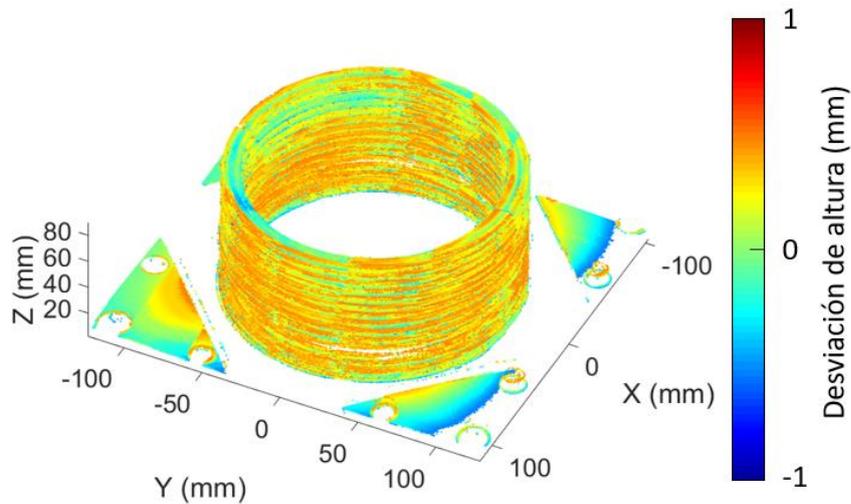


Figura 97. Nubes de puntos resultantes de los escaneos de varios grupos de capas en diferentes etapas de la fabricación.

6.5.3. Digitalizado de geometría para la asistencia al mecanizado postproceso.

El digitalizado de la geometría completa puede servir igualmente como referencia para las operaciones de acabado por mecanizado posterior. En la Figura 98a se ilustra el alabe fabricado en acero inoxidable mediante LMD-P. Tras la fabricación, se realizó un escaneo de la geometría y su reconstrucción completa mediante alineamiento de los escaneos (Figura 98b).

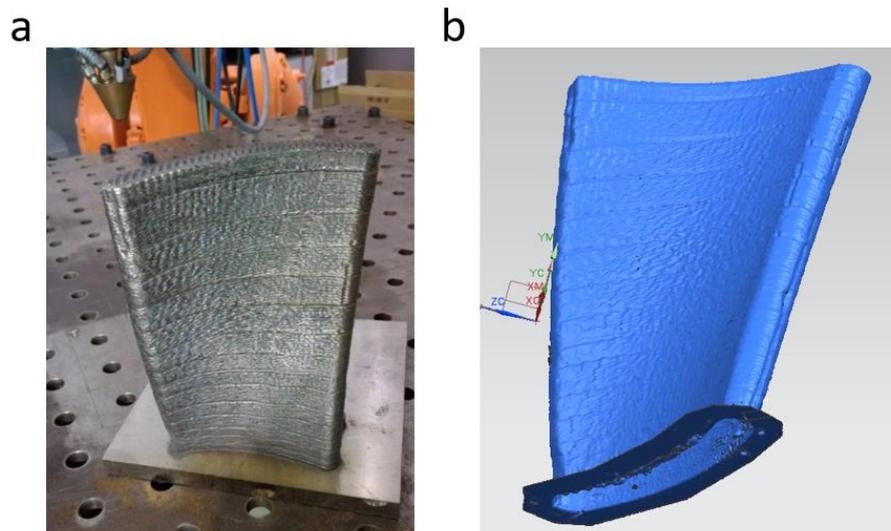


Figura 98. Alabe de acero inoxidable fabricado mediante LMD-P. a) Geometría final tras su fabricación; b) digitalizado de la geometría mediante alineamiento manual y cosido de diferentes escaneos.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

La referenciación de la pieza en el centro de mecanizado puede suponer un problema si no se han establecido previamente unas referencias claras de la posición de la pieza fabricada respecto al sustrato. En este caso, el escaneo de la pieza se empleó para establecer esta referencia. En la Figura 99a se muestra la superposición del escaneo completo de la pieza, en azul, junto con la geometría teórica de la pieza, en rojo. Por otro lado, puesto que el alineamiento de los diferentes escaneos puede introducir un cierto error, se empleó un escaneo individual conteniendo además de parte de la pieza, tres de las caras del sustrato. Estas tres caras fueron empleadas para establecer las referencias en el software de generación de trayectorias NX del mismo modo que se realizó en el centro de mecanizado. Finalmente, en la Figura 99b puede observarse el álabe tras un mecanizado parcial de su superficie como demostrador.

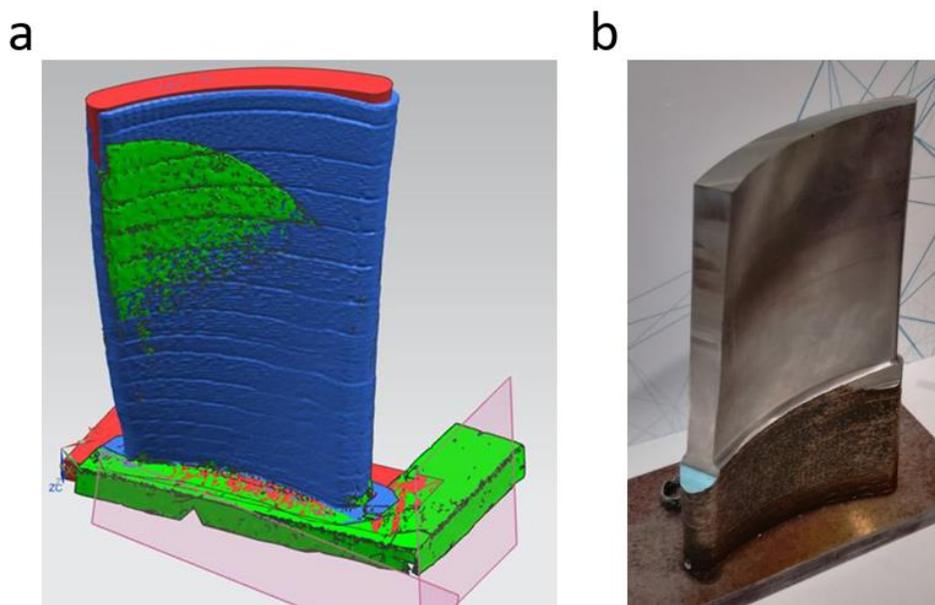


Figura 99. Apoyo al mecanizado posterior de la pieza mediante el digitalizado de la geometría. a) Alineamiento del escaneo de la pieza a la geometría teórica; b) demostrador de pieza parcialmente mecanizada.

6.6. Conclusiones

Mientras que los sistemas de digitalizado tridimensional basados en la proyección de luz estructurada ofrecen ventajas en cuanto a rapidez y volumen de medida, por el momento cuentan con limitaciones a la hora de ser aplicados sobre el proceso LMD.

Por un lado, uno de los aspectos aún por resolver consiste en la incapacidad de realizar medidas precisas sobre el material sometido a altas temperaturas. Para

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

solventarlo, son necesarios nuevos desarrollos en los sensores de medida, por lo que por el momento la solución pasa por realizar medidas intercaladas con diferentes etapas de fabricación. Igualmente, el simple hecho de realizar la medida en el propio sistema de fabricación y en mayor medida por el alto aporte energético de una tecnología DED, produce que las condiciones de medida no sean las óptimas. Por un lado, esto puede afectar en la precisión de medida del propio escáner. Además, los escaneos son tomados en general en un momento en el que la pieza se encuentra todavía a cierta temperatura y, por lo tanto, el resultado es dependiente de los efectos de dilatación y contracción de la pieza tras la acción del láser. Por otro lado, muchas piezas suelen ser ancladas a la mesa de fabricación para evitar su distorsión en proceso, por lo que toman una curvatura al ser liberadas de sus anclajes. Finalmente, de cara a liberar las tensiones residuales introducidas por los repentinos cambios de temperatura en las piezas, estas suelen requerir de un tratamiento térmico, lo que modifica de nuevo las geometrías fabricadas. Por este motivo, las medidas realizadas en el sistema de fabricación no sustituirán en general las medidas realizadas en un control de calidad posterior en un centro de medida con condiciones controladas. Por el contrario, pueden ser de especial utilidad para detectar grandes distorsiones en proceso y corregirlas antes de un posible fallo de la fabricación, o como apoyo a modelos térmicos desarrollados para un proceso DED.

Por otro lado, se encuentra la limitación que algunas superficies especulares introducen en la calidad de los escaneos. En este capítulo se ha comprobado cómo para un mismo material, el diferente acabado superficial puede tener una influencia determinante en la calidad del escaneo, e incluso puede imposibilitar la medida. Mientras que la comparativa ha sido realizada sobre bolas de patrón cerámico, por su elevada precisión e idoneidad para el digitalizado, este aspecto es igualmente extrapolable a las piezas metálicas fabricadas en esta tesis. Materiales como el titanio requieren del empleo de una atmosfera controlada para evitar la oxidación del material al ser sometido a alta temperatura, lo que por otro lado resulta en una superficie brillante que puede dificultar el escaneo. Este aspecto, compromete en gran medida la calidad del digitalizado. Algunos de los factores que pueden ser modificados para mejorar en cierta medida el resultado son, por ejemplo, la minimización de la iluminación del ambiente junto con un aumento de los tiempos de exposición de las cámaras del escáner, una mayor resolución empleada en el escaneo o la medida de la superficie desde diferentes ángulos.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En este capítulo se han descrito, además, varios métodos para la calibración extrínseca del escáner de medida, que han dado como resultado la transformación geométrica que es necesario aplicar a la nube de puntos escaneada para posteriormente extraer información que pueda ser de utilidad para controlar el proceso.

En primer lugar, la configuración del escáner de medida ya sea colocado en una posición fija o en el cabezal de aporte, marca el método de calibración a emplear. Por otro lado, de cara a obtener las coordenadas de los escaneos en el sistema de coordenadas de la máquina o robot, ha sido necesario introducir un patrón físico de calibración. En este sentido, se ha presentado un caso en el que el patrón de calibración ha sido palpado mediante el robot y otro caso en el que éste ha sido escaneado desde varias orientaciones. Las soluciones en las que los escaneos se toman en coordenadas de trabajo permiten realizar correcciones locales sobre la pieza. Además, puesto que las nubes de puntos se transforman a un sistema de coordenadas fijo, los diferentes escaneos quedan alineados automáticamente, no siendo necesario aplicar operaciones de alineación adicionales en las nubes de puntos para reconstruir la superficie completa de la pieza.

En cualquier caso, los métodos de calibración cuentan con la incertidumbre resultante de diferentes fuentes de error como el posicionamiento del robot, el método de calibración, las tolerancias del patrón de calibración, el error de medida del escáner o los errores debidos al efecto de los cambios de temperatura. Aunque no se ha realizado un estudio de la incertidumbre resultante de la combinación de las distintas fuentes esto podría ser interesante a fin de ver cual ofrece unos resultados más precisos. Sin embargo, el hecho de que los métodos DED construyan una preforma con unas tolerancias de fabricación holgadas hace que la precisión de la medida requerida no sea tan elevada.

Por otro lado, obtener las coordenadas de la pieza escaneada en el sistema de coordenadas de fabricación posibilitaría además la generación de trayectorias de proceso sobre piezas de las que no se dispone de un modelo CAD, o en la que existen desviaciones respecto de la geometría teórica. Por lo tanto, aparte de la FA, esta metodología podría ser empleada para la aplicación sobre otros procesos como la soldadura, corte, recubrimiento o rebarbado.

Por último, obtener un modelo digital de la pieza mientras esta es fabricada ofrece posibilidades como la comparativa de la pieza real fabricada contra la geometría

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

teórica y la predicción de distorsiones, el desarrollo de control del crecimiento de la pieza o la asistencia y optimización del post-procesado del componente como en el caso del mecanizado de acabado. Las diferentes metodologías de calibración extrínseca son empleadas en los diferentes controles de altura descritos en el Capítulo 7 para establecer un control dimensional de la pieza fabricada y detectar posibles distorsiones de la pieza en proceso.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Capítulo 7. Control de altura del proceso LMD

7.1. Introducción

Tal y como se ha descrito en el Capítulo 2, unos de los aspectos para llegar a fabricar piezas de forma repetitiva y con las tolerancias adecuadas mediante los métodos DED es la monitorización y el control geométrico de las piezas fabricadas. Puesto que las geometrías a fabricar parten en la mayoría de los casos únicamente de una base sobre la que se aporta el material, es común que existan diferencias geométricas entre la pieza diseñada y la que se obtiene de la fabricación. A esto hay que añadirle las distorsiones que pueden llegar a generarse como consecuencia de las altas temperaturas alcanzadas en el proceso, y que pueden llegar a deformar la pieza durante la fabricación.

Por otro lado, la determinación del crecimiento de la pieza en cada capa suele ser el resultado de una serie de ensayos de prueba-error en las que se obtiene la distancia que el sistema de movimiento (robot o máquina) debe desplazarse en la dirección del crecimiento entre cada capa aportada. En condiciones no controladas esta distancia puede no coincidir con el crecimiento real, dando lugar a errores de altura que pueden resultar en un fallo del proceso o perjudicar las tolerancias en la pieza final. Además, en el caso de geometrías complejas o de gran tamaño, el crecimiento de la pieza puede verse afectado por los aspectos térmicos del proceso en una etapa intermedia de la fabricación de la pieza.

Para evitar los fallos en el proceso por una distancia inadecuada y lograr unas mejores tolerancias en fabricación, en este capítulo se presentan tres metodologías de control de altura basadas en la medición de la pieza con un escáner de luz estructurada. En la Tabla 10 se resumen las capacidades de estas tres metodologías para controlar la altura de crecimiento de las piezas fabricadas.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Tipo de control	7.2. Control de altura del proceso LMD basado en la selección de las capas a aportar previamente calculadas	7.3. Control de altura del proceso LMD basado en generación de trayectorias adaptativas	7.4. Control de altura del proceso LMD basado en la modificación de los parámetros de proceso para el ajuste local del crecimiento de la capa
Control del crecimiento medio de la pieza	Sí	Sí	Sí
Cálculo de trayectorias	Antes del proceso	Durante el proceso	Durante el proceso
Modificación de trayectorias	No. Únicamente decisión de las capas a aportar.	Sí. Altura de capa y altura de pieza a la que aportar material	Sí. Altura de capa, altura de pieza a la que aportar material y velocidad de avance del robot.
Control local de desviaciones	No	No	Sí. Modificación de la tasa de aporte mediante la variación de la velocidad de avance del robot.

Tabla 10. Capacidades de las metodologías de control de altura desarrolladas.

Las tres metodologías desarrolladas son presentadas en los siguientes apartados con una estructura en la que inicialmente se describe la metodología desarrollada, posteriormente se analizan los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones extraídas. Cada metodología ha sido desarrollada a partir de los avances de la metodología anterior, por lo que las capacidades del control de altura también van en aumento. Por el contrario, a medida que las capacidades del control aumentan, la calibración del sistema de medida o el ajuste de las variables definidas por el usuario en el control también aumentan la complejidad del método de control de altura.

Finalmente, las tres metodologías pueden ser aplicadas tanto al proceso LMD-P como LMD-W. En el caso del efecto del proceso LMD-P, el efecto de auto-compensación del error de altura de la pieza descrito en el apartado 4.3 provoca que las desviaciones locales de altura, por lo general, puedan mantenerse estables sin la aplicación de un control local de altura. Por otro lado, en el caso del proceso LMD-W, como se ha detallado en el apartado 4.4, ha quedado evidenciado como el control local de las desviaciones de altura es un aspecto crítico. Es por este motivo, que las piezas de demostración de la aplicación de los controles de altura de los apartados 7.2 y 7.3 han sido fabricadas mediante LMD-P mientras que las del apartado 7.4 se han producido por medio del proceso LMD-W.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

7.2. Control de altura del proceso LMD basado en la selección de las capas a aportar previamente calculadas

En las metodologías de control de altura desarrolladas la medición de las superficies superiores de las piezas se realizó cada cierto número de capas requiriendo de paradas en diferentes etapas del proceso.

En este caso, las paradas realizadas entre capas fueron empleadas para seleccionar las capas de los siguientes grupos de capas a aportar a través de un algoritmo que decide el número de capas a añadir o eliminar en función de la altura medida en la pieza. Para demostrar la eficacia de la estrategia de control de altura se aportó la misma geometría con diferentes distancias entre capas con y sin la aplicación del control, mostrando sus diferencias en términos de eficiencia de atrapamiento de polvo, reproducibilidad de la geometría CAD y estabilidad en el proceso.

7.2.1. Metodología de control de altura basada en la selección de capas a aportar

7.2.1.1. Descripción del control de altura basado en la selección de capas a aportar

El esquema de la estrategia de control empleada en la fabricación de las piezas es mostrado en la Figura 100. El proceso comienza por la definición de la geometría en un software CAD comercial, en este caso Solidworks. Posteriormente, se generan las trayectorias en base a parámetros definidos por el usuario como la altura de capa teórica, el número de perímetros por capa, el patrón de relleno, la distancia entre cordones adyacentes o el grado de solape entre cordones.

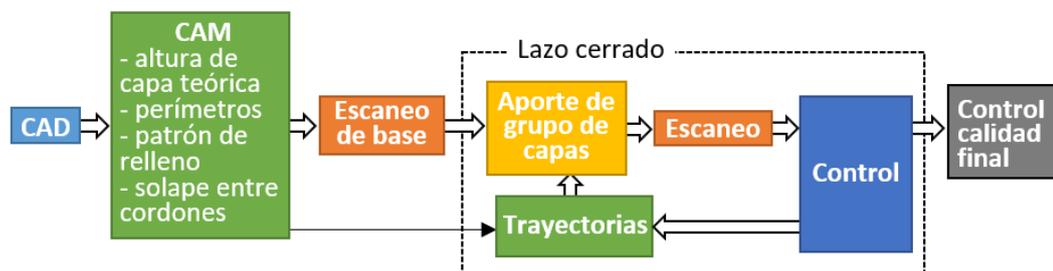


Figura 100. Procedimiento llevado a cabo en la experimentación

Para la validación de este método de control de altura, la configuración del escáner empleada fue fija, de tal forma que el volumen de escaneado abarcó el volumen completo de fabricación de la pieza. El método de calibración empleado fue el presentado en el apartado 6.3.1, por lo que una vez generado el programa con las

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

trayectorias, se colocó la placa substrato y se realizó el proceso de referenciación del escáner y obtención de la matriz de transformación de los puntos al sistema de coordenadas UCS.

En este momento comienza el aporte de la pieza en un lazo cerrado en el que se aporta un grupo de capas, a continuación se escanea la pieza, se aplica la estrategia de control y finalmente se toma la decisión sobre las siguientes capas a aportar. Al terminar la fabricación de la pieza, ésta es sometida a los controles de calidad interna y externa requeridos.

La Figura 101 muestra en detalle el lazo cerrado empleado en la fabricación de la pieza. Como se ha mencionado, este comienza con el aporte de un número n de capas. Puesto que la altura de capa teórica es diferente en cada uno de los casos, el número de capas a aportar es definido acorde al crecimiento de la pieza, siendo de 10 capas para los casos de altura de capa teórica de 0,3 mm (casos a y b), de 3 capas para la altura teórica de 1 mm (casos c y d) y de 5 capas para la altura teórica de 0,7 mm (casos e y f).

Una vez aportado el grupo de capas se escanea la pieza y se realiza la referenciación de la nube de puntos al UCS. De esta forma es posible calcular la altura media de la pieza, h_r , a partir del escaneo realizado. La diferencia entre h_r y la altura teórica que debería haber alcanzado la pieza, h_t , resulta en el error de crecimiento, e (13).

$$e = h_r - h_t \quad (13)$$

En caso de un error positivo, la pieza hubiera crecido más de lo esperado mientras que un error negativo indica un crecimiento menor de lo esperado. La estrategia de control propuesta en este trabajo consiste en emplear las propias trayectorias de aporte calculadas inicialmente para la pieza para repetir una capa en el caso de un error negativo y para eliminar capas posteriores si el error es positivo. El número de capas a añadir o eliminar es determinado dividiendo el error de crecimiento entre la altura de capa teórica. Como el resultado de esta operación no necesariamente resulta en un número entero, este debe ser redondeado (14).

$$\begin{aligned} n_a &= \text{round}(|e|/h_t), \text{ if } e < 0 \\ n_r &= \text{round}(e/h_t), \text{ if } e > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

A continuación, se aportan las capas necesarias o se eliminan de las trayectorias calculadas y se prosigue con la fabricación hasta alcanzar la altura final de la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

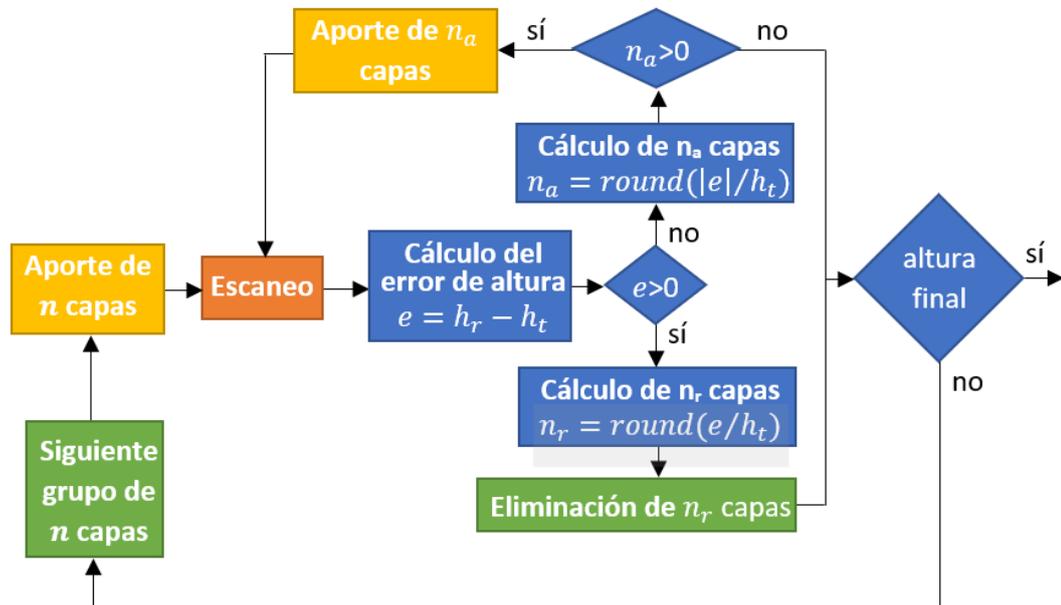


Figura 101. Lazo cerrado de control para el ajuste de la altura de capa real en base a la eliminación o a la adición de capas.

Una representación esquemática de la actuación control es presentada en la Figura 102. En ella se presentan los casos en los que la altura teórica h_t es de 0,5 mm (Figura 102a) y de 1,5 mm (Figura 102c). Por otro lado, se supone una altura de capa real, es decir, un crecimiento de la pieza de 1 mm. En la Figura 102b la altura de capa teórica es menor que la real por lo que la pieza crece más de lo esperado. Por ello, si el proceso se para cada 5 capas, es necesario eliminar capas hasta retomar la altura de la pieza teórica. Por el contrario, en la Figura 102d la altura teórica es mayor que la real, por lo que la pieza crece menos de lo esperado. En este caso, al aportar un grupo de 3 capas, sería necesario repetir la última capa hasta alcanzar la altura necesaria.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

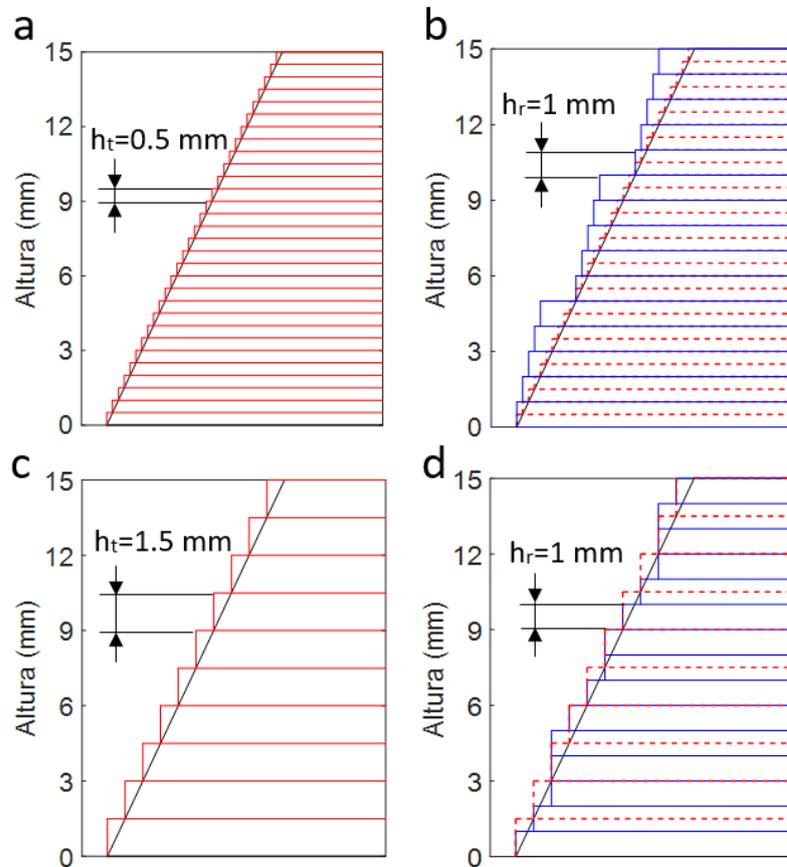


Figura 102. Ejemplo de aplicación del control.

Cabe destacar en este punto que los acabados superficiales obtenidos del proceso LMD no suelen ser adecuados para la pieza final, por lo que la práctica totalidad de las piezas es diseñada con ciertas creces que deben ser posteriormente mecanizadas. Sin embargo, por el alto coste del material aportado y la dificultad para ser mecanizado es conveniente que la geometría aportada sea cercana al CAD ideal. Como se ha visto en el ejemplo de la Figura 102, esto es conseguido mediante la estrategia de control propuesta, puesto que mantiene el error en un valor controlado y evita la propagación del error de altura. En este ejemplo no se tiene en cuenta el efecto de la desviación de altura sobre el crecimiento de la pieza, y únicamente sirve para ilustrar la aplicación del control. Sin embargo, para errores de altura moderados el crecimiento de la pieza depende menos de la desviación de altura y más de los efectos térmicos. Este es un aspecto importante ya que el control propuesto es capaz de actuar ante las desviaciones de altura independientemente de su origen.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

7.2.1.2. Parámetros del proceso LMD-P

Para validar la eficacia del control de altura se empleó el proceso LMD-P. El polvo empleado en estas pruebas fue el acero inoxidable martensítico Metco 42C. Las bases sobre las que se fabricaron las piezas fueron placas de 10 mm de espesor de acero al carbono DIN C45E.

Algunos de los parámetros de entrada fueron fijados para todas las pruebas, como la potencia láser en 1200 W, la velocidad de avance del robot en 15 mm/s o el caudal de material insertado en 10 g/min. Los parámetros de aporte son resumidos en la Tabla 11.

Potencia láser (W)	Caudal de material (g/min)	Velocidad de avance de robot (mm/s)	Caudal de gas de protección, argón (l/min)
1200	10	15	12

Tabla 11. Parámetros del proceso LMD-P empleados para el control de altura basado en la selección de capas a aportar.

Por otro lado, la altura de capa teórica fue variada para las diferentes pruebas. En base a la altura de capa teórica y a la aplicación o no aplicación del control de altura se plantean las piezas fabricadas en los casos de la Tabla 12.

Caso	Altura de capa teórica (mm)	Aplicación del control de altura
a	0,3	No
b	0,3	Sí
c	1	No
d	1	Sí
e	0,7	No
f	0,7	Sí

Tabla 12. Casos de piezas fabricadas con diferentes alturas de capa teóricas y con la aplicación o no aplicación del control de altura desarrollado en este apartado.

Puesto que el crecimiento real de cada capa era conocido por anteriores pruebas, siendo aproximadamente 0,75 mm, los valores de altura de capa teórica fueron fijados de tal forma que se dieran casos en los que la pieza creciese más de lo esperado, menos o aproximadamente lo mismo a lo introducido en la generación de trayectorias. Esto corresponde en un caso de fabricación real a una definición del parámetro altura de capa teórica poco precisa.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

7.2.1.3. Geometría y generación de trayectorias

La trayectoria de aporte de cada capa consistió en un patrón de relleno zig-zag y un perímetro externo. El inicio y final de cada perímetro se eligió de forma aleatoria en cada capa, evitando la posible aparición de un defecto en el punto de unión entre inicio y final. En base a experimentación previa con los parámetros de aporte se estableció un solape entre cordones del 40% dando lugar a una distancia entre cordones de 1,3 mm. Las trayectorias de aporte y movimiento sin aporte son mostradas en la Figura 103.

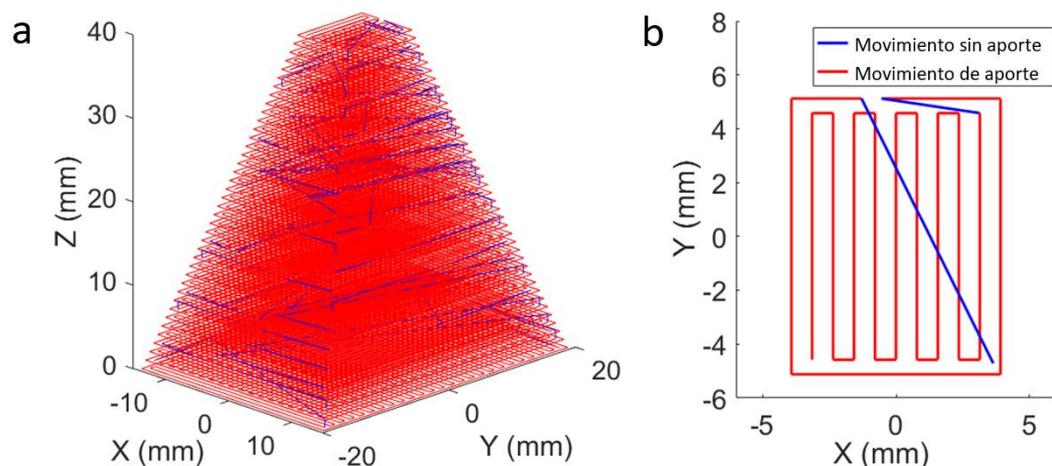


Figura 103. Trayectorias de aporte. En azul se muestran los movimientos sin aporte y en rojo los de aporte. a) Trayectorias de aporte de la pieza completa; b) trayectorias de aporte una sola capa.

7.2.2. Análisis experimental del control de altura basado en la selección de capas a aportar

En este apartado se presentan las piezas fabricadas en los casos presentados con tres diferentes alturas de capa teóricas y la aplicación o no del control de altura. Por un lado, se grafica el error de altura donde cada punto es una medida tomada por el escáner. Además, se muestra una comparativa de la pieza fabricada respecto del CAD original realizada por medio del software GOM Inspect. Las desviaciones respecto del modelo geométrico pueden ser fácilmente comparadas entre los casos dado que en todas ellas se emplea la misma escala de colores.

7.2.2.1. Caso a. Altura de capa teórica de 0,3 mm sin control

En este caso la altura de capa teórica fue inferior al crecimiento real. Se observó cómo a medida que la pieza fue creciendo la distancia entre boquilla de aporte y pieza fue menor que la ideal. Por ello, las condiciones no fueron las óptimas y hubo gran cantidad de polvo introducido que no se fundió, disminuyendo en gran medida

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

la eficiencia del proceso. Además, puesto que la altura de capa fue reducida, fueron necesarias más capas para generar la pieza, lo que aumento el tiempo de fabricación. La desviación de la geometría generada respecto del CAD fue elevada (Figura 104a) aumentando el volumen de la pieza y de esta forma el mecanizado posterior. Por el contrario, no se observaron grandes poros en el interior de la pieza (Figura 104b).

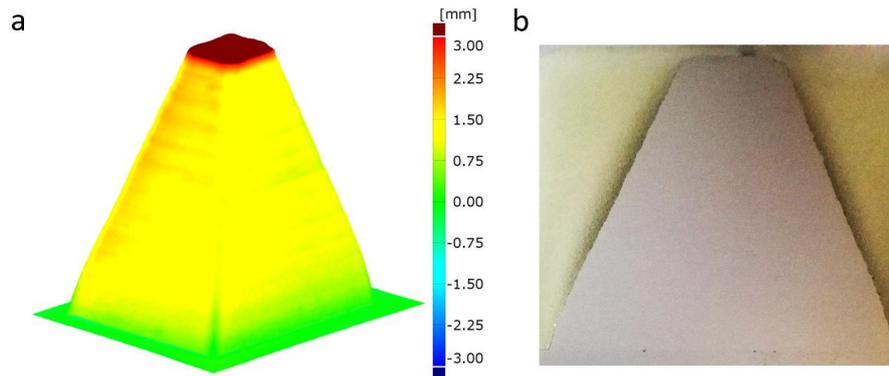


Figura 104. Pieza fabricada sin control con 0,3 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.

7.2.2.2. Caso b. Altura de capa teórica de 0,3 mm con control

La altura de capa teórica de 0,3 mm fue probada de nuevo, en este caso con la aplicación del control. Como la pieza tendió a crecer más de lo introducido por la altura de capa teórica, fue necesario eliminar varias capas tras el aporte de cada grupo de capas. Esto corresponde con los escalones de la Figura 105a en la que se muestra la comparativa contra el CAD. Aun así, puede observarse unas menores desviaciones respecto al caso sin control, lo que minimizaría las operaciones de mecanizado posterior. De nuevo no se apreciaron poros de gran tamaño (Figura 105b).

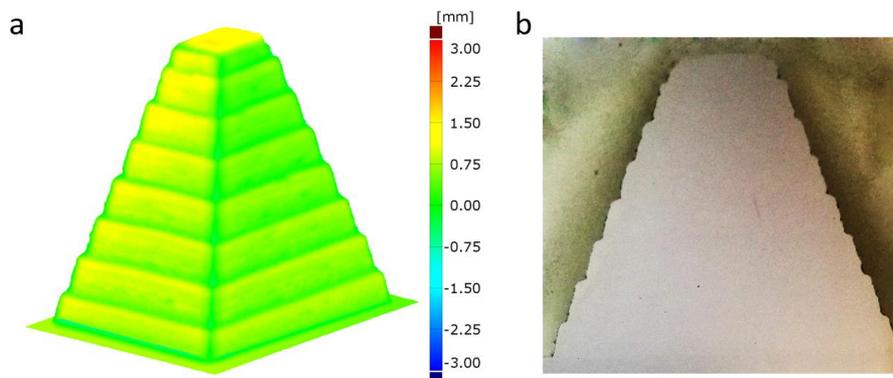


Figura 105. Pieza fabricada con control con 0,3 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

La Figura 106 muestra la evolución del error de altura en la pieza para los casos de 0,3 mm de altura de capa teórica con y sin la aplicación del control. En el caso de la no aplicación del control puede observarse como el error de altura creció rápidamente para el primer grupo de capas y después se estabilizó en un valor aproximado de 3,6 mm. La explicación para esta estabilización es, como también se analiza en el apartado 4.3, que, una vez alcanzado este valor, el cabezal no es capaz de aportar más material que el permitido por la altura de capa teórica, por lo que el crecimiento de la pieza coincide con el movimiento vertical del cabezal entre capas. Por otro lado, esto conlleva una gran cantidad de material no fundido. Con la aplicación del control, tras el aporte de cada grupo de capas, ciertas capas fueron eliminadas, por lo que el error de altura tomó un valor aproximadamente nulo. A continuación, el error volvió a aumentar rápidamente hasta la siguiente corrección. Por otro lado, mediante la aplicación de la estrategia de control fue posible reducir el número de 134 capas a 75 capas, ahorrando tiempo y material.

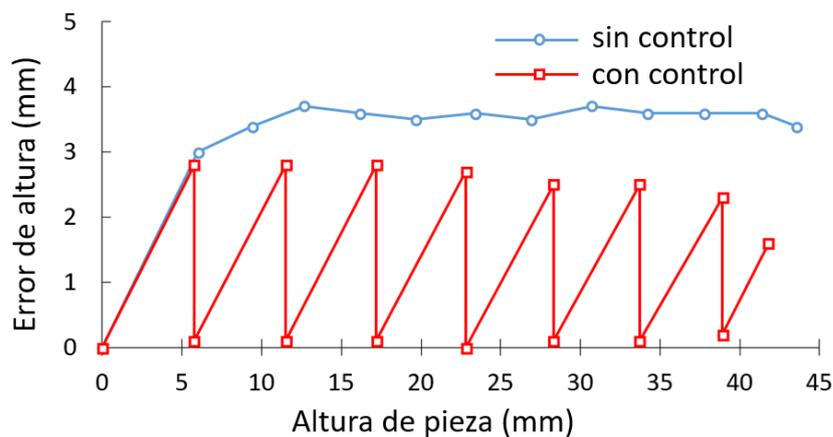


Figura 106. Error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para una altura de capa teórica de 0,3 mm. Casos con control (rojo) y sin control (azul) de altura.

7.2.2.3. Caso c. Altura de capa teórica de 1 mm sin control

En el tercer caso propuesto la altura de capa teórica fue mayor que el crecimiento real en condiciones óptimas. Al contrario que en el caso a, el crecimiento de la pieza no se estabilizó y el crecimiento de la pieza fue menor que el teórico. Esto es ilustrado en la comparativa contra el CAD de la Figura 107a, en la que la desviación se hace más considerable a medida que la pieza crece y no se alcanzó la altura requerida en la pieza. A pesar de estas condiciones no óptimas de aporte, no se apreció porosidad considerable en la pieza (Figura 107b).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

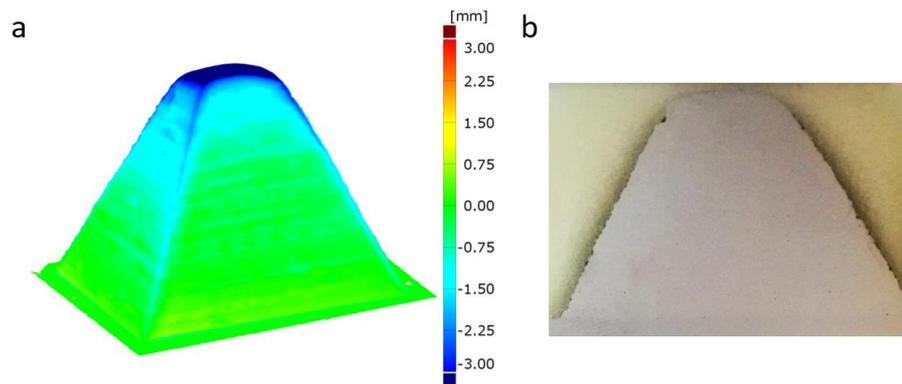


Figura 107. Pieza fabricada sin control con 1 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.

7.2.2.4. Caso d. Altura de capa teórica de 1 mm con control

Mediante la aplicación del control en este caso se consiguió replicar de forma correcta el CAD (Figura 108a). Aunque se detectaron algunos poros en el corte de la pieza, la cantidad de datos obtenidos en un solo corte no permite extraer una conclusión en cuanto a la relación entre las condiciones de aporte y la aparición de defectos internos (Figura 108b).

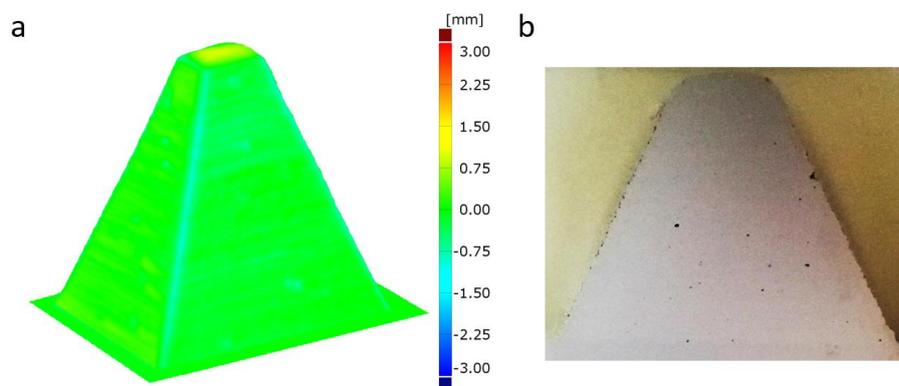


Figura 108. Pieza fabricada con control con 0,3 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.

En la comparativa de los errores de altura mostrada en la Figura 109 se puede observar cómo en el caso en el que no se aplicó el control, el error aumentó hasta valores elevados, lo que dio lugar a una inestabilidad en el aporte. Por el contrario, en el caso controlado, el error fue mantenido cercano al milímetro. El número de capas para el caso con control fue aumentado de 40 capas a 57 capas, lo que corresponde con la introducción de 17 capas correctivas.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

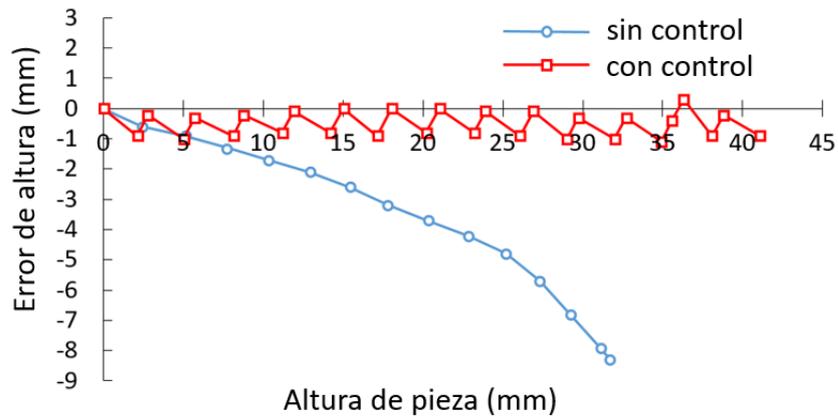


Figura 109. Error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para una altura de capa teórica de 1 mm. Casos con control (rojo) y sin control (azul) de altura.

7.2.2.5. Caso e. Altura de capa teórica de 0,7 mm sin control

Los casos anteriores fueron fabricados con alturas teóricas muy diferentes del crecimiento real de las piezas. Sin embargo, es habitual conocer el crecimiento aproximado de la pieza debido a una experimentación previa. Por este motivo, se probaron casos con una altura teórica de 0,7 mm que, supuestamente, fue ligeramente menor que el crecimiento real de la pieza. Considerando los resultados de los anteriores casos esta parece ser la situación más favorable.

Estableciendo una altura de capa de 0,7 mm hubo una buena correspondencia entre la fabricación y el CAD de partida (Figura 110a), incluso sin la aplicación del control de altura. Aunque la porosidad a lo largo de la pieza fue baja (Figura 110b), se detectó un único poro de tamaño considerable, lo que de nuevo no permite extraer conclusiones de la relación entre la porosidad y las condiciones de proceso.

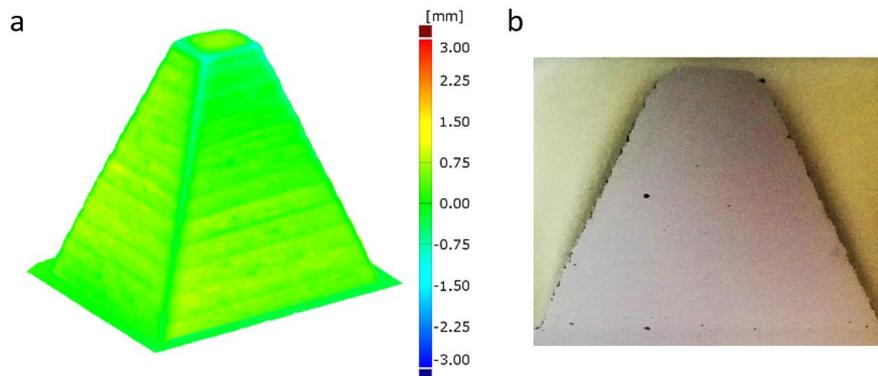


Figura 110. Pieza fabricada sin control con 0,7 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

7.2.2.6. Caso f. Altura de capa teórica de 0,7 mm con control

Aunque el caso anterior, con una altura de capa de 0,7 mm sin la aplicación del control tenga una buena correspondencia con el CAD de partida, en este caso se aplicó la estrategia de control para evaluar una posible mejora en un caso que se ajuste más a la realidad. Comparando las desviaciones respecto del CAD de la Figura 110a y Figura 111a puede apreciarse como la desviación es inapreciable en el caso con control, al contrario que en el caso de que éste no se aplicó. De nuevo, únicamente pequeños poros fueron detectados en la pieza (Figura 111b).

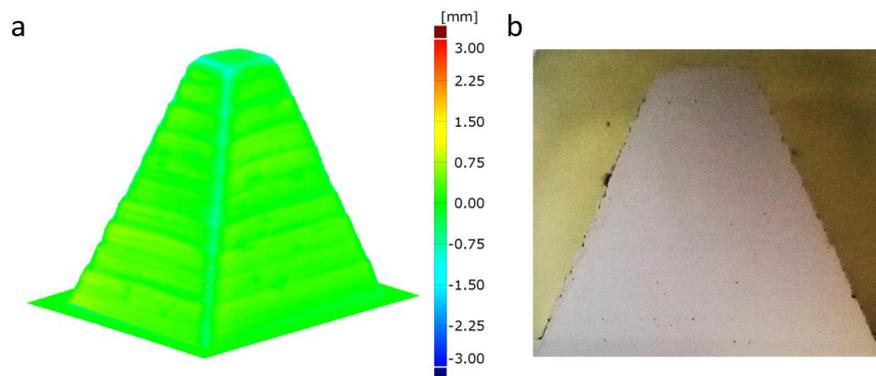


Figura 111. Pieza fabricada con control con 0,7 mm de altura de capa teórica. a) Desviación respecto al CAD; b) corte de la pieza.

El gráfico de la Figura 112 evidencia lo descrito. En el caso sin control, el error creció al principio del aporte y a medida que se aportaron grupos de capas el crecimiento disminuyó, probablemente alcanzando al final del aporte la misma estabilidad que en el caso a, con un valor de estabilización menor. Como puede verse en el caso en el que se aplica el control, al finalizar algunos grupos de capas no fue necesario realizar correcciones. Sin embargo, el error se fue acumulando y posteriormente fue necesario aplicar el control. El error en este caso se mantuvo inferior a 0,7 mm, mientras que el número de capas se redujo de 57 a 52.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

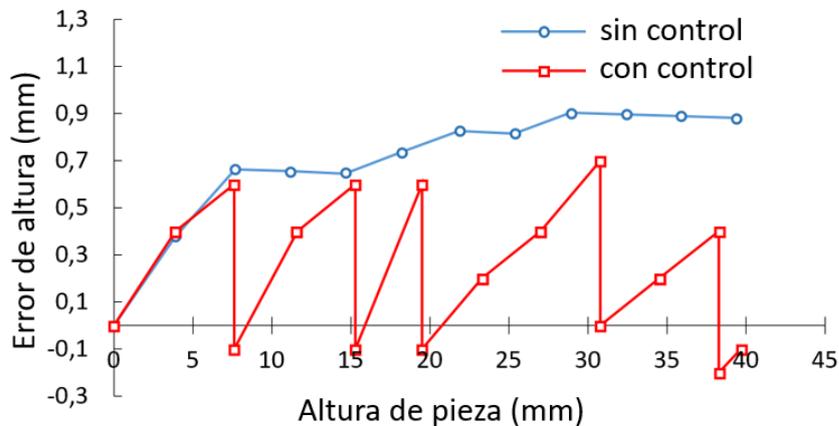


Figura 112. Error de altura en función de la altura alcanzada en la pieza para una altura de capa teórica de 0,7 mm. Casos con control (rojo) y sin control (azul) de altura.

7.2.3. Conclusiones

En este trabajo se demuestra la posibilidad de implantar un control de altura basado en la medición de la pieza en etapas intermedias de su fabricación con un escáner de luz estructurada. Se han probado como la aplicación del control mejora la reproducibilidad de la pieza fabricada respecto del CAD original, reduciendo el tiempo de fabricación, el material empleado y las operaciones de mecanizado posteriores.

En cuanto al proceso de aporte, corroborando las conclusiones obtenidas en el apartado 4.3, se ha comprobado cómo es preferible introducir una altura de capa teórica (la introducida en la generación de trayectorias) ligeramente inferior al crecimiento real de la pieza. De esta forma a medida que crece la pieza, la distancia entre boquilla y pieza disminuye hasta estabilizarse en un valor.

En cuanto a la integridad de las piezas fabricadas, aunque se han realizado cortes para evaluar su sección, no ha sido posible obtener una relación entre las condiciones de aporte o la aplicación o no del control de altura y la aparición de defectos internos. Una razón podría ser que la aparición de defectos debería analizarse de forma estadística, por lo que serían necesarias una mayor cantidad de datos para extraer estas relaciones. Por otro lado, a la hora de determinar las condiciones que dan lugar a defectos internos, el efecto de una desviación de altura podría combinarse con otros aspectos como la temperatura de la pieza, la distribución de porosidad en las propias partículas de polvo o la precisión de la trayectoria, entre otros.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Por otro lado, aplicando la metodología de control de altura descrita en este apartado se generaron las trayectorias de aporte de toda la pieza previamente, siendo después utilizadas para añadir o eliminar capas en función de la decisión de la estrategia de control. Esto conlleva que, en caso de tener un valor de altura de capa incorrectamente definido, o que el crecimiento de la pieza varíe a lo largo de su altura por efectos térmicos, por ejemplo, no sea suficiente con las trayectorias definidas inicialmente. Una solución en la que las trayectorias de aporte son calculadas durante la fabricación de la pieza y en función de la pieza escaneada es desarrollada en el apartado 7.3.

7.3. Control de altura del proceso LMD basado en generación de trayectorias adaptativas

El esquema de la estrategia de control descrito en el apartado 7.2 es mostrado en la Figura 113a. En esta estrategia, las trayectorias de aporte de la pieza completa son generadas al inicio del proceso y posteriormente el control repite o elimina capas en función de la altura medida en la pieza. Esta estrategia cuenta con la desventaja de que un parámetro incorrectamente definido en la generación de las trayectorias es arrastrado a lo largo de toda la fabricación. Por otro lado, el control no es capaz de actuar ante las variaciones de crecimiento de la pieza, por ejemplo, por un mayor calentamiento de esta, que conlleva un aumento de la tasa de atrapamiento de material en el caso del proceso LMD-P.

Por ello, en las metodologías de control de altura presentadas en los apartados 7.3 y 7.4 se emplea una estrategia diferente, basada en el recálculo de las trayectorias de aporte en función de la medida de altura realizada sobre la pieza (Figura 113b). De esta forma, algunos de los parámetros de la generación de las trayectorias asociados con el crecimiento de la pieza pueden ser modificados en función del resultado de la fabricación. Igualmente, puesto que únicamente es necesario calcular las trayectorias de un grupo de capas, el tiempo de cálculo de estas es muy inferior al tiempo de cálculo total de la pieza, por lo que es posible integrar esta metodología en proceso sin alterar apenas el tiempo de producción.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

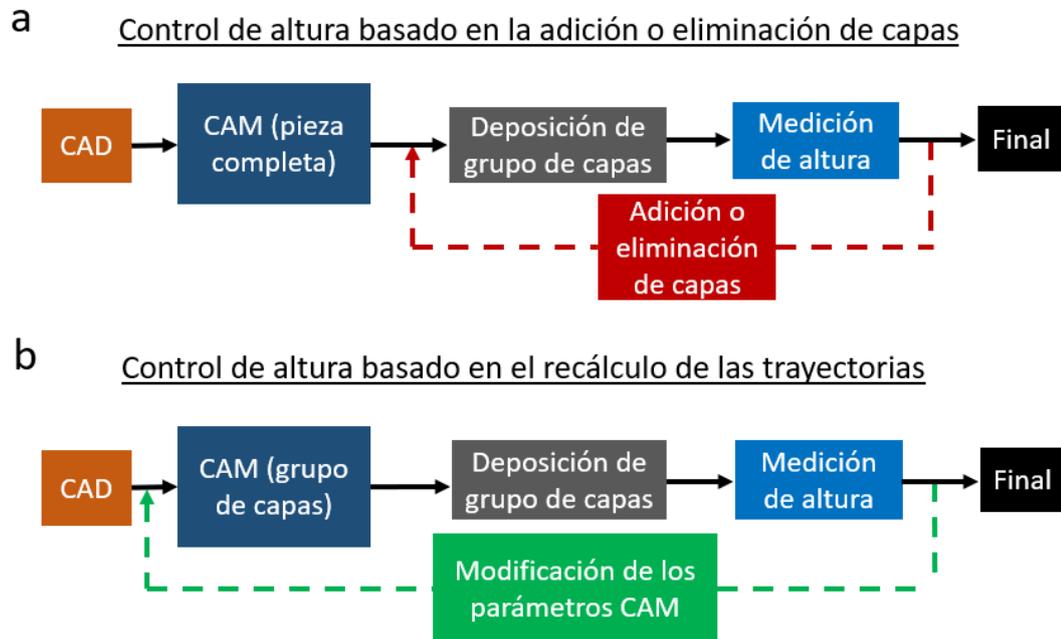


Figura 113. Estrategias de control de altura. a) Control de altura basado en la modificación de las capas a aportar previamente calculadas (apartado 7.2); b) control de altura basado en la generación de trayectorias adaptativas (apartados 7.3 y 7.4).

En este apartado, se presenta un control de la altura media de la capa en la que se modifica la posición vertical del robot en la fabricación y la altura de capa teórica. Para verificar la eficacia del control se aplicará esta metodología en la fabricación de una pieza de tamaño medio mediante el proceso LMD-P, tratando de demostrar las ventajas de generar las trayectorias de aporte durante el proceso, de manera adaptativa.

7.3.1. Metodología de control de altura basado en generación de trayectorias adaptativas

7.3.1.1. Descripción del control de altura basado en la modificación adaptativa de las trayectorias de aporte

La estrategia de control presentada en este apartado presenta algunas diferencias respecto de lo expuesto en el apartado 7.2. Una de las grandes diferencias es que las trayectorias de aporte no son calculadas al inicio del aporte para toda la pieza, sino que se calculan únicamente para el grupo de capas a aportar. Esto permite realizar correcciones sobre la altura de la pieza mientras esta está siendo fabricada.

El esquema de la estrategia de control llevada a cabo se muestra en la Figura 114.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

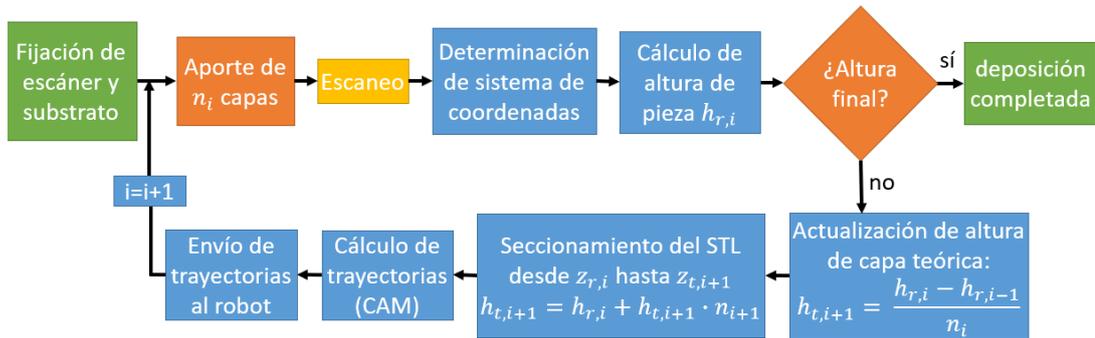


Figura 114. Estrategia de control de altura mediante cálculo de trayectorias adaptativas.

En primer lugar, se coloca el escáner en una posición fija que permite visualizar el volumen completo de la pieza a fabricar. Posteriormente, comienza la fabricación de la pieza aportando un grupo de capas. Si como en el caso anterior, tras el aporte de un grupo de capas i , se escanea la superficie superior de la pieza y se determina su altura, aunque la altura teórica de la pieza haya sido cuidadosamente ajustada al crecimiento real de la pieza, siempre existirá un error entre la altura de la pieza real, $h_{r,i}$, y la teórica, $h_{t,i}$ (15).

$$e_i = h_{r,i} - h_{t,i} \quad (15)$$

Este error puede aumentar a lo largo del aporte, dando lugar a una distancia entre cabezal y pieza no óptima.

La altura de pieza teórica, es decir, la altura de pieza que se espera tras el aporte de un grupo i de capas es calculada mediante (16).

$$h_{t,i} = h_{r,i-1} + l_{t,i} \cdot n_i \quad (16)$$

Donde:

$h_{r,i-1}$ es la altura real de la pieza antes de aportar el grupo i de capas

$l_{t,i}$ es la altura teórica de capa para el grupo de capas i

n_i es el número de capas a aportar en el grupo de capas i

Si al final del aporte la altura final de la pieza no ha sido alcanzada, se continúa con la fabricación de la pieza. En primer lugar, se actualiza el valor de la altura de capa teórica en función del crecimiento real de la pieza por medio de (17).

$$l_{t,i+1} = \frac{h_{r,i} - h_{r,i-1}}{n_i} \quad (17)$$

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

El volumen por aportar en el siguiente grupo de capas consiste en el seccionamiento del CAD desde la altura real de la pieza medida por el escáner, $h_{r,i}$, hasta a la nueva altura teórica esperada, $h_{t,i+1}$, que es de nuevo calculada usando (16). El seccionamiento de la pieza es mostrado en la Figura 115, donde el volumen aportado en el último grupo de capas es representado en color rojo y el volumen a aportar en el siguiente grupo de capas se muestra mediante un relleno con líneas diagonales azules y blancas.

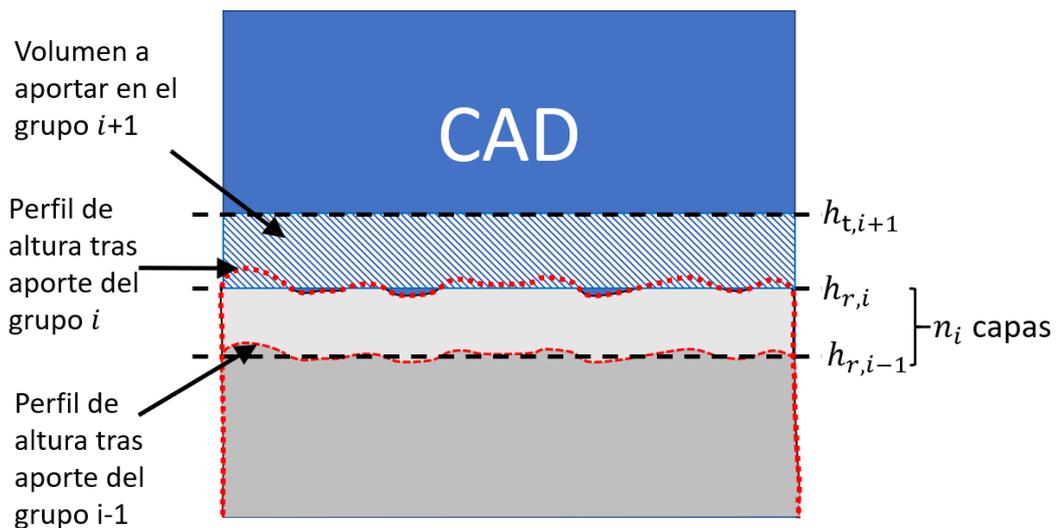


Figura 115. Seccionamiento del CAD basado en el escaneado de la pieza.

El formato de CAD empleado para la fabricación de las piezas es el STL o Standard Triangle Language, que como indica su nombre está compuesto por superficies triangulares, denominadas facetas, que definen la geometría de la pieza de forma discreta (Figura 116a). El seccionamiento del STL desde la altura medida por el escáner, $h_{r,i}$, hasta la siguiente altura a aportar, $h_{t,i+1}$, es ilustrado en la Figura 116b. El método empleado para obtener las nuevas facetas fue similar a los presentados en [127, 128]. Posteriormente, se calcularon las trayectorias de aporte dentro de la sección del STL (Figura 116c).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

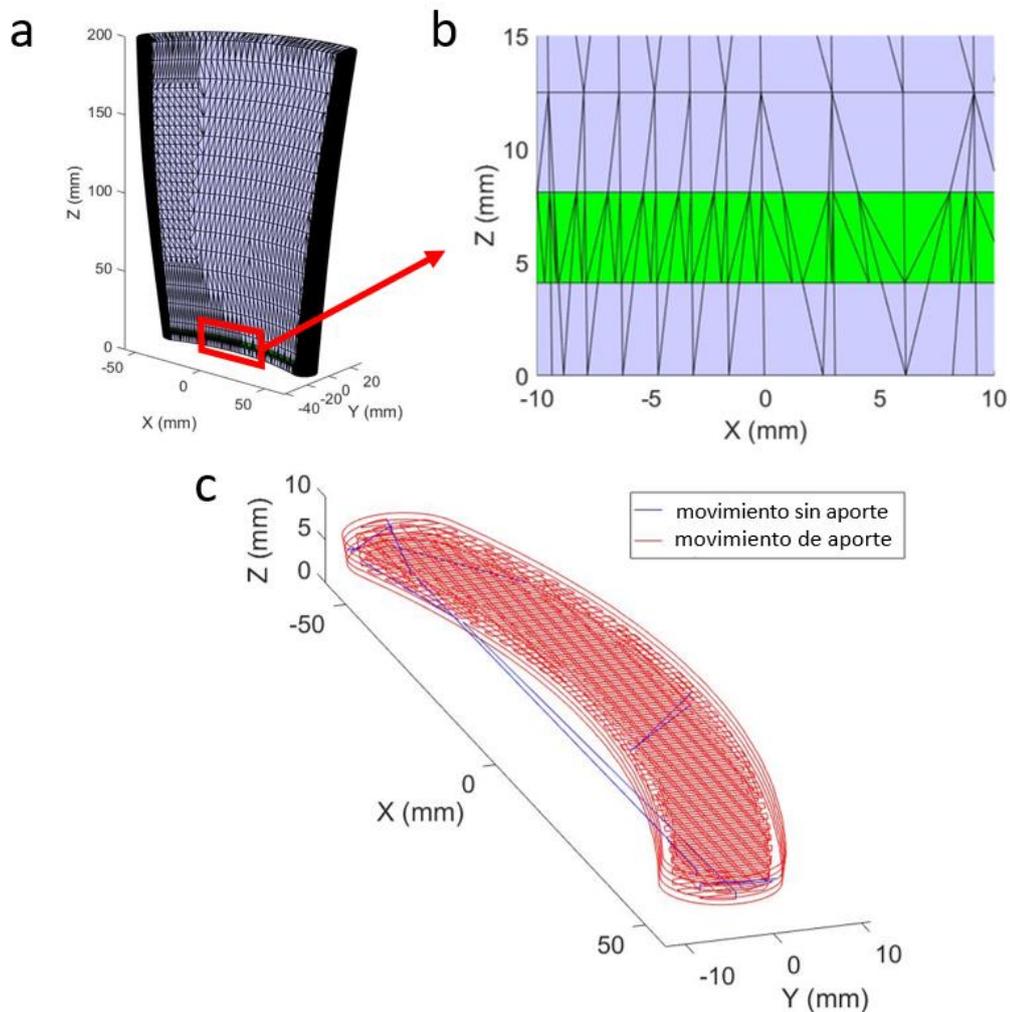


Figura 116. Seccionamiento del CAD y cálculo de las trayectorias de aporte. A) CAD de la pieza completa en formato STL; b) detalle del CAD de la pieza mostrando la sección verde a aportar; c) trayectorias de aporte calculadas en el interior de la sección a aportar.

Mediante la aplicación de este control, la estabilidad en el crecimiento de la pieza se ve aumentada y se evita la propagación del error en la dirección de crecimiento de la pieza. Además, se reducen las pruebas previas al aporte de la pieza para determinar el crecimiento de cada capa, ya que es posible adaptar el valor de la altura de capa teórica durante el proceso. Para agilizar la actuación del control, las trayectorias de aporte son automáticamente generadas en el lenguaje RAPID del robot, del fabricante ABB, y son enviadas a través del protocolo FTP para que sean cargadas por el robot al inicio de la ejecución del programa. Esto permite realizar

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

medidas sobre la pieza y generar las trayectorias de aporte en lazo cerrado, sin la necesidad de la intervención del usuario.

7.3.1.2. *Parámetros del proceso LMD-P*

Para la demostración de la aplicación del control de altura, de nuevo se empleó el proceso LMD-P. El material de aporte fue el acero inoxidable Metco 42C. La potencia láser empleada fue de 2200 W. La velocidad de avance del robot fue 15 mm/s, mientras que el caudal de polvo insertado fue de 15 g/min. Los parámetros del proceso LMD-P son presentados en la Tabla 13.

Potencia láser (W)	Caudal de material (g/min)	Velocidad de avance de robot (mm/s)	Caudal de gas de protección, argón (l/min)
2200	15	15	12

Tabla 13. Parámetros del proceso LMD-P empleados para el control de altura basado en la modificación adaptativa de las trayectorias de aporte.

En cuanto a las trayectorias, el solape entre cordones fue de 1,5 mm, lo que supone un 40% de solape entre cordones adyacentes, de 2,5 mm de ancho. El relleno de la pieza, como puede observarse en la Figura 116c, consistió en un relleno en zig-zag, alternando 90 grados la dirección de cada capa, con un perímetro externo.

El número de capas a aportar entre cada escaneo fue fijado de forma manual en este caso, aunque en una aplicación real podría ajustarse automáticamente, por ejemplo, en función del valor del error de altura medido en la pieza.

7.3.2. *Análisis experimental del control de altura basado en la generación de trayectorias adaptativas*

La geometría tipo alabe de la Figura 117 fue fabricada mediante el proceso LMD-P para probar la eficacia del control de altura en una pieza de tamaño medio.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA



Figura 117. Pieza de demostración de la aplicación del control de altura en el proceso LMD-P.

En la Figura 118b se presenta una comparativa de la geometría fabricada contra el CAD de teórico. Aunque la pieza fue construida satisfactoriamente, pueden verse mayores desviaciones respecto del CAD a medida que la pieza fue creciendo. Esto podría ser debido a una mayor dificultad a la hora de disipar el calor y por tanto a un aumento de la temperatura que hizo que se acumulase material en determinadas zonas. Por otro lado, existen otros efectos que puede provocar un exceso o defecto de material en diferentes zonas de la pieza como el propio ángulo de las paredes de la pieza respecto de la vertical o las distorsiones en la pieza debido a efectos térmicos. Fruto de estos efectos es el crecimiento desigual que puede observarse en los extremos de la parte superior de la pieza en la Figura 118b. Puesto que los efectos térmicos que originan estas desviaciones locales suelen estar mezclados requieren de un estudio en mayor profundidad que no es el objeto de este trabajo. Por el contrario, en el siguiente apartado se desarrollará un control de altura local que permita mantener el crecimiento de las capas plano a lo largo de la capa.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

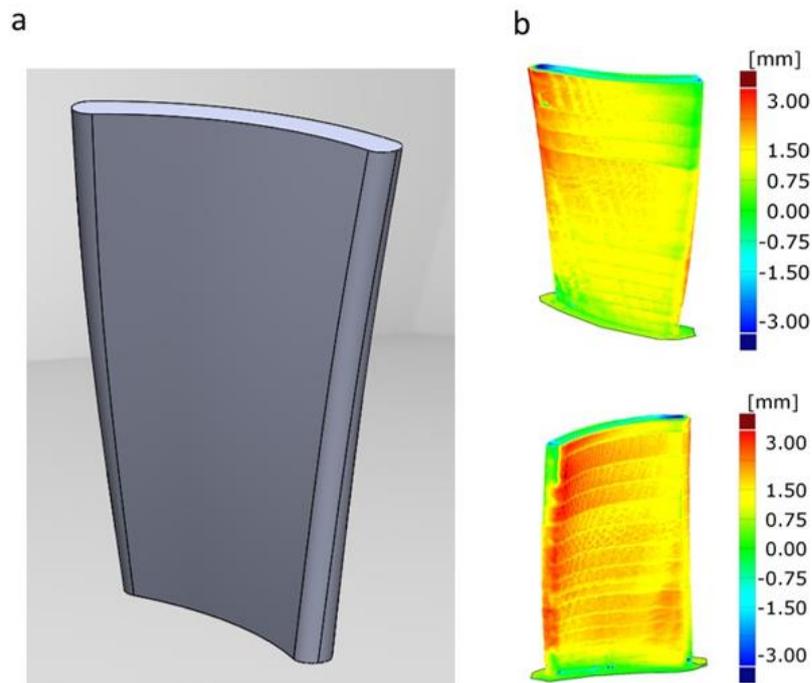


Figura 118. Pieza de demostración de la estrategia de control de altura para el proceso LMD-P. a) Modelo CAD de la pieza; b) desviaciones de la geometría fabricada respecto del CAD de partida.

7.3.3. Conclusiones

En la estrategia de control de altura presentada en este apartado, el aporte de material se realizó por grupos de capas. Las trayectorias de relleno de cada grupo de capas se calcularon durante el proceso, en función de la altura alcanzada medida por el escáner de luz estructurada. De esta forma, el parámetro altura de capa teórica fue ajustado en función del crecimiento de las anteriores capas aportadas, minimizando las desviaciones respecto de la geometría teórica, reduciendo las pruebas de puesta a punto previas y aumentando la estabilidad y eficiencia del proceso.

Por otro lado, se han detectado desviaciones en las piezas respecto del modelo CAD, en parte debidas al calentamiento desigual de la pieza en sus diferentes etapas de fabricación o zonas. Los efectos térmicos requieren de un estudio en profundidad que no se realiza en este trabajo, por lo que únicamente se limita a un control geométrico de la pieza fabricada. Sin embargo, es evidente que para alcanzar la pieza con las tolerancias deseadas y una pieza lo más ‘near net shape’ posible es imprescindible tratar tanto el aspecto térmico como el geométrico en conjunto.

Finalmente, la estrategia de control desarrollada en este apartado únicamente ha actuado sobre la altura de la capa completa, obviando las diferencias de altura

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

dentro de la capa. Esto ha provocado que se den variaciones de altura en diferentes zonas de la pieza. En el apartado 7.4 se abordará este asunto por medio del desarrollo de un control de altura intra-capas, en el que es posible actuar sobre el crecimiento de la pieza en zonas determinadas de la pieza.

7.4. Control de altura del proceso LMD basado en la modificación de los parámetros de proceso para el ajuste local del crecimiento de la capa

El apartado 7.3 ha dado como resultado una estrategia de control de altura que permite asegurar el correcto crecimiento de las piezas fabricadas al mismo tiempo que reducir las pruebas de puesta a punto del proceso de aporte. Una de las principales razones es que las trayectorias de aporte se calculan durante la fabricación, por lo que el proceso es más robusto ante cambios de condiciones en el aporte y el conocimiento del proceso no juega un papel tan crítico.

Por otro lado, a lo largo de este documento se ha mencionado que el control de altura es aún más necesario en el caso de aportar hilo metálico. Mientras que en el caso del polvo es posible alcanzar una situación de estabilidad a costa de reducir ligeramente la eficiencia de atrapamiento de polvo, el aporte de hilo requiere de una distancia entre boquilla y pieza óptima a lo largo de toda la fabricación. Es por ello, que los desarrollos de este apartado se aplican sobre piezas aportadas con material en forma de hilo metálico.

Hasta el momento, las estrategias de control de altura presentadas han sido capaces de adaptar las trayectorias de aporte a la altura de la pieza medida por un escáner tridimensional. Sin embargo, las correcciones de altura se han realizado únicamente a partir de la media o la moda de los valores de altura de la pieza. Esto puede suponer una limitación en el caso de piezas con un crecimiento desigual en diferentes zonas o en caso de aparición de defectos en los que la altura se vea incrementada o reducida. Un ejemplo de esta limitación se ilustra en la Figura 119. En ella se presenta una pieza con forma de álabe fabricada por LMD-P que cuenta con una sección desigual en sus diferentes zonas, ya que unos de los extremos del álabe es más estrecho que el otro. Aun aplicando el control de altura del apartado 7.3, como resultado de la acumulación del calor en la zona en la que se aporta más material, el atrapamiento de material es mayor que en el lado opuesto. Es por ello, que el control de altura desarrollado en los anteriores apartados fue capaz de aplicar

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

correcciones en uno de los lados, pero esto fue perjudicial para la otra zona de la pieza.

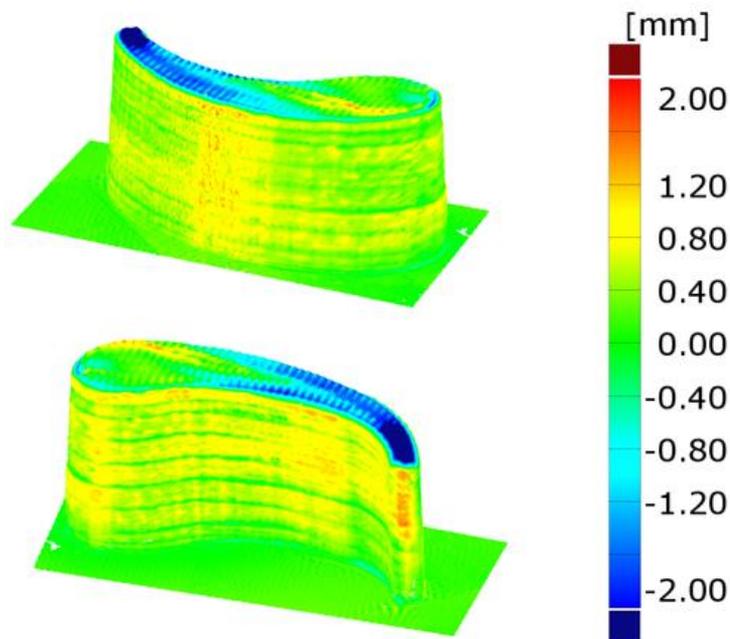


Figura 119. Comparativa contra CAD de pieza fabricada por LMD-P. Como consecuencia de las diferencias en su sección y los efectos térmicos, el crecimiento de la pieza es mayor en las zonas en las que se acumula más material.

Por este motivo, es necesario desarrollar nuevos métodos de corrección de altura aplicables a todo tipo de geometrías, y capaces de actuar localmente para corregir las desviaciones en el crecimiento de la pieza. En este trabajo se presenta una solución a este problema en la que uno de los parámetros del proceso, la velocidad del robot, fue variado en función de la medida de altura para ajustar la tasa de aporte local dentro de la capa. De esta forma, se pretende demostrar la capacidad para mantener una superficie plana a lo largo de toda la fabricación. Para comprobar la eficacia del control de altura intra-capas, se plantearon dos casos:

- Caso 1: defectos provocados: En este caso se fabricaron defectos provocados, en los que se generaron situaciones de crecimiento desigual de forma deliberada, que fueron corregidas posteriormente gracias al control de altura.
- Caso 2: pieza de demostración: Se fabricó una pieza cilíndrica en la que se aplicó el control de altura para lograr la estabilidad en proceso durante la fabricación.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

7.4.1. Metodología de control de altura local basada en la variación de la tasa de aporte

7.4.1.1. *Descripción del control de altura local basada en la variación de la tasa de aporte*

Al igual que en los apartados 7.2 y 7.3, una vez aportado un grupo de capas, se detiene el aporte y se realiza un escaneo de la pieza obteniendo una nube de puntos de la superficie superior. Gracias al procedimiento de calibración, las coordenadas de esta nube de puntos están referidas al sistema de coordenadas máquina, MCS, en este caso al sistema de coordenadas de trabajo del robot. Puesto que se conoce el volumen de fabricación de la pieza, en una primera etapa se eliminan los puntos fuera de este volumen, para así reducir el tiempo de cálculo y el tiempo de parada en la fabricación.

Basado en este escaneo se calculan las trayectorias de aporte para el siguiente grupo de capas. En este caso, el procedimiento de parada, escaneo y cálculo de trayectorias se ha realizado para cada capa individual.

En la Figura 120a se ilustra el esquema de la estrategia de control de altura empleada en este apartado. Al igual que en los anteriores apartados, por muy estable que sea el aporte y óptimos sean los parámetros de aporte siempre existirá un error entre el perfil de altura de la pieza, h_s , y la altura teórica de la pieza, h_t (18).

$$e = h_s - h_t \quad (18)$$

Para facilitar la actuación del control y aplicar unas correcciones más moderadas, el error de altura es dividido en el error medio, e_m , y en el error intra-capas, e_l . El error medio es la diferencia entre la altura media de la capa, h_m , y la altura teórica, h_t , mientras que el error intra-capas representa la desviación del perfil de alturas, h_s , respecto de h_m (19).

$$e = e_m + e_l = (h_m - h_t) + (h_s - h_m) \quad (19)$$

De esta forma, el control de altura es aplicado en dos etapas:

- Control de altura media de la capa.
- Control de altura local intra-capas.

Los dos controles de altura son explicados en los siguientes subapartados.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

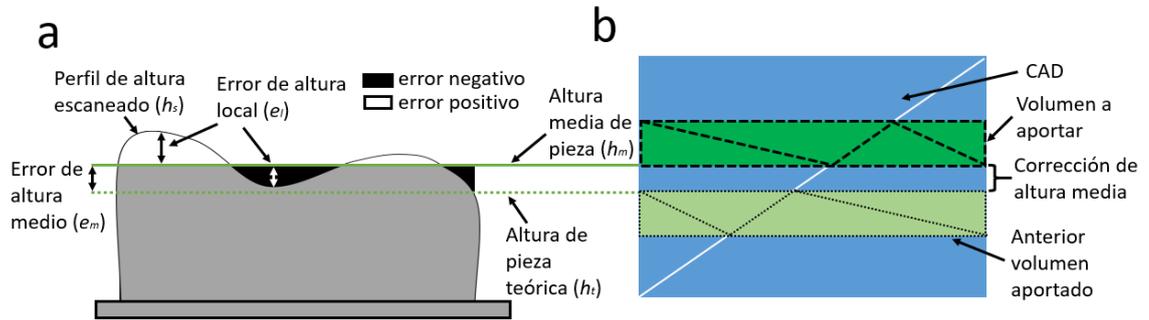


Figura 120. Estrategia de corrección de la altura media de la capa y desviaciones locales intra-capa. a) Desviaciones de la pieza respecto de la altura media de la capa; b) corrección de la altura media realizando el corte sobre el CAD, en formato STL, empezando desde la altura media de la capa.

7.4.1.1.1. Corrección de la altura media de capa

Para el control de la altura media de la capa se emplea el procedimiento descrito en el apartado 7.3, en el que el CAD de la pieza es cortado desde la altura media de la pieza, h_m , hasta la siguiente altura teórica a alcanzar (Figura 120b).

Una vez obtenido el volumen del CAD a aportar se calculan las trayectorias de aporte. Al igual que en otras piezas de este trabajo, se aplica una estrategia de relleno tipo zig-zag con un perímetro externo. En la Figura 121a puede verse la estrategia de aporte sobre la nube de puntos escaneada en una altura determinada de la pieza. La escala de colores muestra la desviación de altura respecto de la altura media de la pieza.

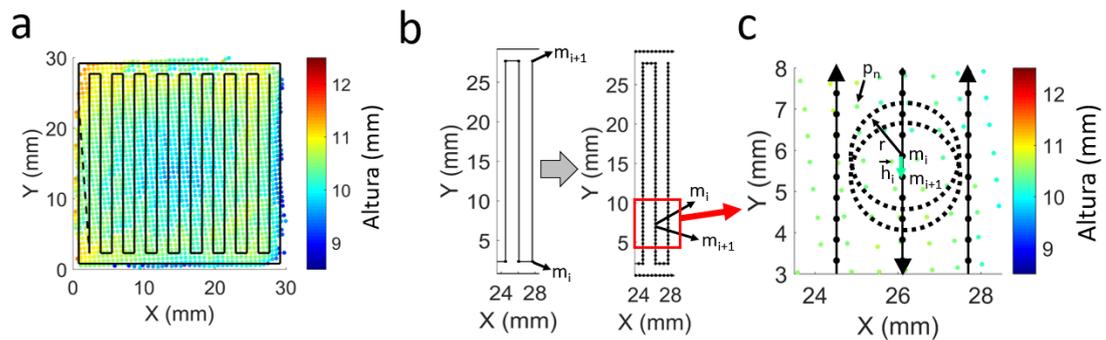


Figura 121. Control local de altura intra-capa basado en escaneo del perfil de altura de la pieza. a) Nube de puntos escaneada en la pieza y trayectorias de aporte; b) discretización de la trayectoria. Izq.: Puntos consecutivos antes de discretización. Dcha.: Puntos consecutivos tras discretización; c) control de altura intra-capa.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

7.4.1.1.2. Corrección de la altura local dentro de la capa

Anteriormente se ha concluido que el control de la altura media de la capa no es suficiente para garantizar el crecimiento homogéneo y estable de la pieza, especialmente en el caso de piezas de gran tamaño y del proceso LMD-W. A parte de los parámetros de proceso comúnmente referidos como la potencia láser, la velocidad del robot o la tasa de aporte, el crecimiento de la pieza puede verse afectado por otros factores relacionados con el calentamiento y tasa de enfriamiento en diferentes zonas, la geometría de la pieza o la precisión estática y dinámica del robot en sus movimientos. El efecto de estos factores se presenta muchas veces mezclado y es difícil distinguir el efecto individual sobre el resultado final de la pieza. Como ya se ha mencionado en otros puntos, este trabajo no pretende tanto estudiar las causas de las desviaciones de altura como plantear una metodología de control de desviaciones independientemente de su origen.

La base del control de altura intra-capas es introducir una cantidad mayor de material en las zonas en las que la altura es insuficiente y una menor en las que es excesiva. Las principales alternativas para variar la tasa de aporte de material localmente consisten en actuar sobre la velocidad de inserción del hilo metálico o la velocidad de movimiento del robot o máquina en el que está fijado el cabezal de aporte. Mientras que en el caso del LMD-P la tasa de aporte en términos de masa por unidad de tiempo puede verse igualmente afectada por una variación de la potencia láser, debido a un mayor o menor atrapamiento de material, en el caso del hilo no tiene efecto alguno ya que la totalidad del hilo debe ser fundida para que el proceso no falle. En este caso, se ha optado por variar la velocidad de avance del robot en sus trayectorias, aprovechando la capacidad de modificar las trayectorias de aporte capa a capa. Como las desviaciones de altura a corregir son realizadas respecto de la altura media en lugar de la altura teórica, esto da lugar a unas correcciones menos agresivas sobre la pieza, evitando así posibles fallos por goteo de material por una velocidad excesiva o enganches del hilo por una velocidad insuficiente.

Las trayectorias de aporte calculadas consisten en movimientos lineales punto-a-punto, que constituyen una matriz, M , con las coordenadas de los puntos del robot consecutivos (20).

$$M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_i \ \dots \ m_J] \ , \ m_i = \{m_{i_x} \ m_{i_y} \ m_{i_z}\} \quad (20)$$

Para poder introducir correcciones locales, los movimientos lineales son discretizados insertando puntos intermedios. La discretización de la trayectoria es

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

mostrada en la Figura 121b, en la que se representan dos puntos consecutivos, m_i y m_{i+1} , antes y después de la inserción de los puntos intermedios. La distancia entre los puntos introducidos es calculada a partir de un parámetro, d , insertado por el usuario. Si se define como \vec{h}_i al vector que conecta m_i y m_{i+1} , el número de puntos a introducir entre ellos, n_i es calculado por medio de (21).

$$n_i = \text{round}(|\vec{h}_i| / d) - 1, \quad (21)$$

y las coordenadas de los puntos intermedios, m_k , son obtenidas por medio de (22).

$$m_k = m_i + \frac{m_{i+1} - m_i}{n_i + 1} \cdot k, \quad k = 1, 2, \dots, n_i \quad (22)$$

La matriz M es redefinida insertando los nuevos puntos intermedios. Por otro lado, el escaneo de la pieza da como resultado una matriz, P , con las coordenadas de los puntos del escaneo (23).

$$P = [p_1 p_2 \dots p_n \dots p_N], \quad p_n = \begin{cases} p_{n_x} \\ p_{n_y} \\ p_{n_z} \end{cases} \quad (23)$$

La Figura 121c muestra una vista de detalle de los puntos de la trayectoria junto con los puntos escaneados de la pieza y los parámetros que definen el control de altura intra-cap. La estrategia de control consiste en variar la velocidad del robot en el movimiento entre los puntos nuevamente definidos, m_i y m_{i+1} , en función de la altura de los puntos del escaneo cercanos.

Como un punto de la trayectoria, m_i , no es necesariamente coincidente con un punto del escaneo de la pieza, p_n , la desviación de altura asociada a cada punto de la trayectoria, $desv_{m_i}$, es calculada en base a la componente z de los puntos del escaneo que están situados a una distancia menor que un valor definido por el usuario, r (24).

$$desv_{m_i} = \text{mean}(P), \quad P = \{p_{n,z} \mid (p_{n,x} - m_{x_i})^2 + (p_{n,y} - m_{y_i})^2 - r^2 < 0\} \quad (24)$$

La velocidad de avance del robot conectando los puntos m_i y m_{i+1} , $v_{\vec{h}_i}$, es establecida mediante (25), como se muestra en el diagrama de la Figura 122, tomando los valores de las desviaciones de altura asociadas a los puntos de la trayectoria conectados.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

$$v_{\vec{h}_i} = v_{nom} + \frac{v_{max} - v_{nom}}{desv_{max}} \cdot \frac{desv_{m_i} + desv_{m_{i+1}}}{2}, \quad (25)$$

donde v_{nom} es definida como la velocidad nominal a partir de la cual se realizan los ajustes. La pendiente la recta de la Figura 122 es determinada a partir de los parámetros definidos por el usuario $desv_{max}$ y v_{max} , correspondiendo con la máxima desviación a partir de la cual se aplica la máxima variación de velocidad. Estos parámetros determinan la severidad y estabilidad de las correcciones. Si el cambio de velocidad del robot para una desviación de altura es excesivo, el crecimiento de la pieza puede cambiar más de lo necesario para alcanzar la altura objetivo, además de introducir aceleraciones excesivas en el movimiento del robot. Por otro lado, si el cambio de velocidad es insuficiente, un defecto local puede continuar aumentando y permanecer no corregido.

Finalmente, las velocidades mayores que v_{max} y menores que v_{min} son saturadas para asegurar unos parámetros de aporte controlados (26):

$$v_{\vec{h}_i} = \begin{cases} v_{min} , & \text{if } v_i < v_{min} \\ v_{max} , & \text{if } v_i > v_{max} \end{cases} \quad (26)$$

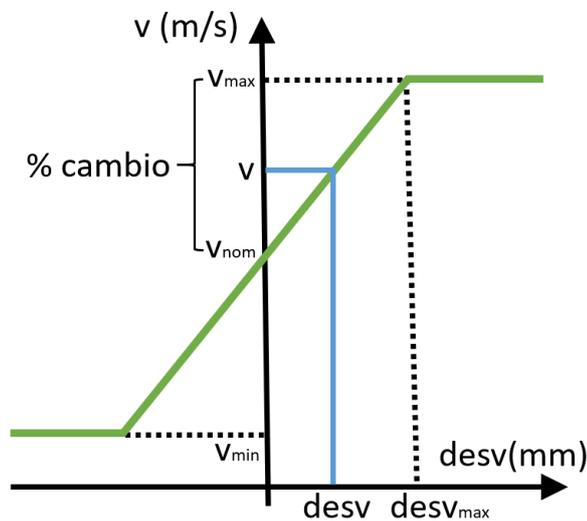


Figura 122. Diagrama del control de altura local basado en la variación de la velocidad de movimiento del robot.

La definición de las velocidades nominal, máxima y mínima ha de tener en cuenta también el posible efecto del cambio de velocidad sobre la calidad interna de la pieza, de cara a garantizar la homogeneidad de las propiedades del componente y una ausencia de defectos internos.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Los parámetros d y r definidos por el usuario y empleados en (21) y (24) respectivamente también influyen en la actuación del control. La Figura 123 muestra las trayectorias de aporte calculadas con diferentes combinaciones de estos dos parámetros, donde la escala de colores representa la velocidad del robot en cada movimiento. En la Figura 123a se fijan valores pequeños de d y r , resultando en un gran número de puntos en la trayectoria y unas desviaciones de altura calculadas con puntos del escaneo muy cercanos a los puntos de la trayectoria. Como resultado, es posible corregir desviaciones de altura con más detalle, pero los cambios de velocidad y por tanto las aceleraciones inducidas son más pronunciadas. Por otro lado, en la Figura 123b se introduce un valor mayor de d y además considerablemente mayor que r . Esto resulta en un número menor de puntos en la trayectoria y unos cambios de velocidad más discretos y repentinos, lo que limita el tamaño de defecto a corregir y produce un movimiento menos uniforme. Finalmente, en la Figura 123c se presentan los parámetros que han sido considerados como adecuados para la ejecución de este trabajo, donde se elige un valor de d relativamente pequeño y ligeramente mayor que el valor de r . De esta forma, es posible corregir desviaciones de altura con una resolución aceptable con unos cambios de velocidad progresivos. Aunque se podría introducir un valor de d aún menor, la mejora podría no ser relevante y el tiempo de cálculo de las trayectorias aumentar considerablemente.

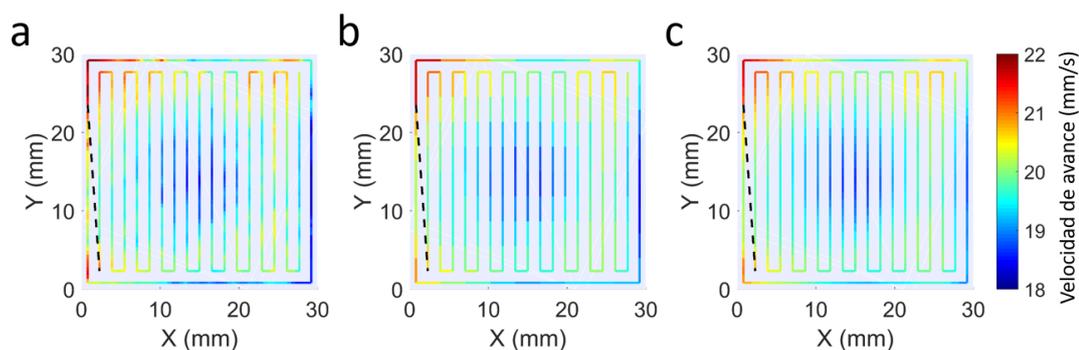


Figura 123. Trayectorias de aporte con diferentes parámetros de entrada en el control de altura intracapa d y r . a) $d=0,5$ mm, $r=0,5$ mm; b) $d=3$ mm, $r=1$ mm; c) $d=1$ mm, $r=2$ mm.

Por último, cabe destacar la influencia que la precisión del robot en trayectoria puede tener sobre las correcciones introducidas en el proceso. Como se apuntaba en el apartado 5.3, en general, existen diferencias entre la trayectoria ideal programada en el robot y la trayectoria que realmente traza este, por lo que las correcciones pueden aplicarse en un punto distinto al programado.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

En este trabajo, este aspecto es solventado por medio de los parámetros d y r , que suavizan este efecto al incrementar la distancia a los puntos usados para calcular las desviaciones de altura, filtrando en cierta manera las desviaciones de altura de la pieza. Por otro lado, una solución alternativa podría ser incorporar las modificaciones del controlador robótico como paso intermedio a las correcciones, aunque para ello, sea necesario disponer de la lógica de este controlador en la aplicación de generación de trayectorias.

7.4.1.2. Geometría y trayectorias

7.4.1.2.1. Caso 1: defectos provocados

Las geometrías fabricadas consistieron en hexaedros de 25x25 mm de sección y 10 capas. La distancia entre cordones se estableció en 1,3 mm. Se empleó la estrategia de relleno en zig-zag alterando la dirección 90 grados entre cada capa y con la introducción de un perímetro externo.

Por otro lado, con el fin de comprobar la efectividad del control de altura intra-capa la geometría de partida consistió en una superficie con cambios de altura provocados. En la Figura 124a se muestra una geometría tipo escalón, mientras que en la Figura 124b se trata de una geometría tipo cajera. Mediante el control de altura intra-capa se trató de reestablecer la planitud de la superficie superior de la geometría introduciendo una mayor cantidad de material en las zonas más bajas de la pieza y una menor cantidad en las más altas.

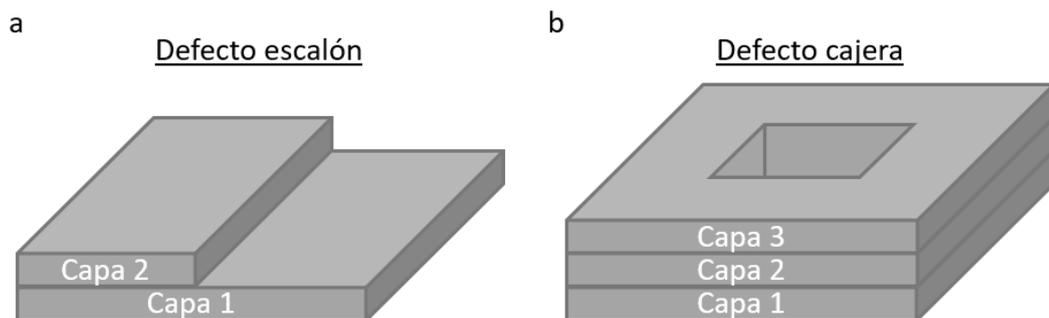


Figura 124. Geometrías con diferencias de altura fabricadas de forma deliberada para la demostración del control de altura basado en la variación local de la tasa de aporte.

7.4.1.2.2. Caso 2: pieza de demostración

Las trayectorias para la fabricación de la pieza demostrador son mostradas en la Figura 125, donde las trayectorias de aporte son representadas en azul junto con los movimientos sin aporte de material, en rojo. Los movimientos consistieron en círculos concéntricos con una separación entre ellos en la dirección radial de 1,76

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

mm, lo que corresponde a un 40% de solape. La distancia vertical entre capas, o altura de capa teórica, se fijó en 1,08 mm. El punto de inicio y final de cada círculo fue establecido de manera aleatoria para evitar la acumulación de material en una determinada zona de la pieza o la aparición de defectos internos. La dirección de aporte de los cilindros dentro de cada capa también fue alternada de dentro hacia fuera y de fuera hacia adentro, para evitar un crecimiento desigual de la pieza.

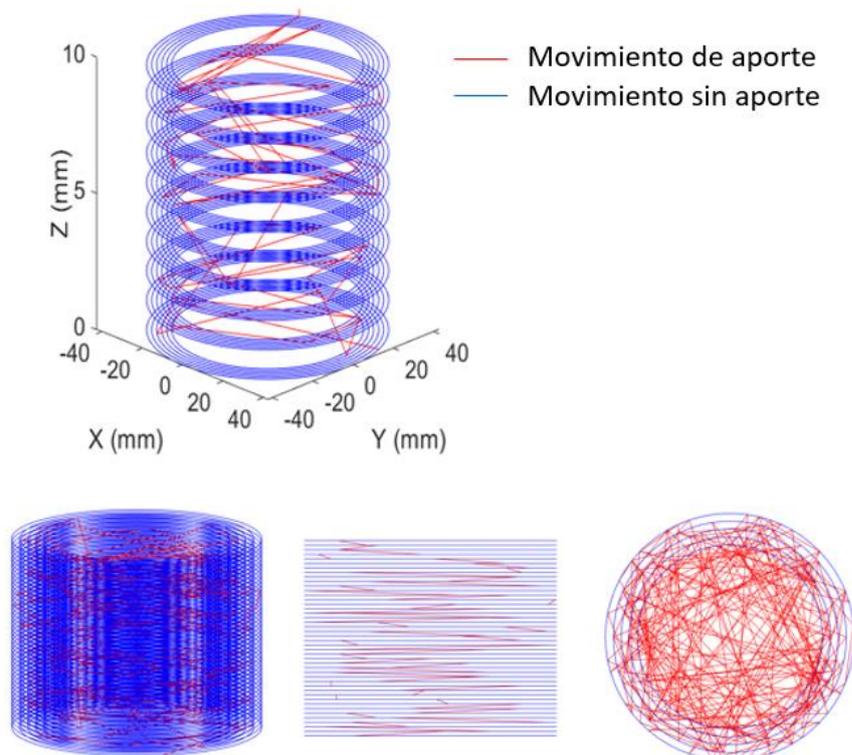


Figura 125. Trayectoria de aporte de cilindro mediante movimientos circulares concéntricos; movimientos de aporte (azul) junto con movimientos sin aporte de material (rojo).

7.4.1.3. Parámetros del proceso LMD-W

7.4.1.3.1. Caso 1: defectos provocados

Debido a la particular importancia del control de altura local en el proceso LMD-W, éste fue el proceso empleado para demostrar la eficacia del control de altura basado en la variación de la tasa de aporte.

El material empleado fue acero inoxidable 316L de 0,8 mm de diámetro. Éste fue aportado sobre placas de acero al carbono DIN C45E.

Los parámetros de aporte empleados son mostrados en la Tabla 14. Todos los parámetros de proceso fueron mantenidos constantes excepto la velocidad de avance del robot que fue variada respecto a la velocidad nominal, fijada en 20 mm/s.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
 PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

El movimiento vertical del robot entre capas fue actualizado en función del crecimiento medio de la capa.

Potencia láser (W)	Velocidad de hilo (m/min)	Tasa de aporte de hilo (kg/h)	Caudal de gas de protección, argón (l/min)	Velocidad de avance de robot (mm/s)
1500	3	0,72	12	16-24

Tabla 14. Parámetros de proceso LMD-W empleados para el demostrador del control de altura en el caso 1.

7.4.1.3.2. Caso 2: pieza de demostración

En este caso el material aportado mediante el proceso LMD-W fue hilo de titanio (Ti6Al4V) de 1,2 mm de diámetro sobre substratos del mismo material de 10 mm de espesor.

Los parámetros de proceso, para este demostrador, fueron los mostrados en la Tabla 15.

Potencia láser (W)	Velocidad de hilo (m/min)	Tasa de aporte de hilo (kg/h)	Caudal de gas de protección, argón (l/min)	Velocidad de avance de robot (mm/s)
2500	3	0,9	12	14,25-15,75

Tabla 15. Parámetros de proceso LMD-W empleados para el demostrador del control de altura en el caso 2.

7.4.2. Análisis experimental del control de altura local basada en la variación de la tasa de aporte

7.4.2.1. Caso 1: defectos provocados

7.4.2.1.1. Influencia del cambio de velocidad sobre la integridad de la pieza

El control de altura intra-capas propuesto actúa sobre la tasa de aporte a través de la velocidad de avance del robot. Por este motivo, es importante verificar la calidad interna de las piezas al introducir variaciones en la velocidad de aporte.

La Figura 126 muestra el hexaedro fabricado con los parámetros indicados y la velocidad nominal constante de 20 mm/s, mientras que en las Figura 126b-f se presentan los mismos hexaedros con velocidades de movimiento constantes por encima y por debajo de la velocidad nominal. En la medida en la que la velocidad de movimiento aumenta manteniendo la trayectoria y el resto de los parámetros de proceso constantes, la altura de la capa y la altura de la pieza final también crece. Por otro lado, aunque el grado de solape entre los cordones pueda variar como

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

consecuencia de un ancho de cordón mayor, los hexaedros obtenidos presentan ausencia de poros o defectos internos para cada una de las velocidades de movimiento.

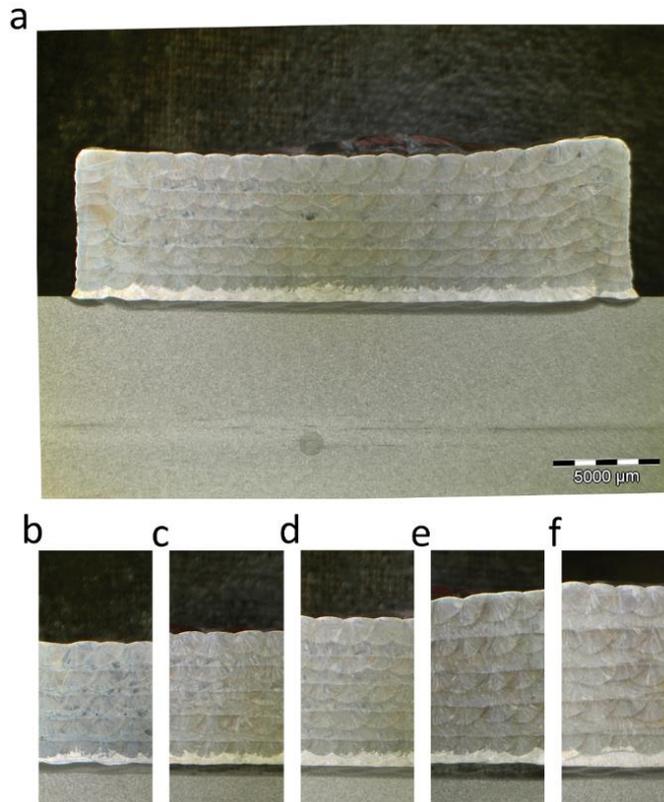


Figura 126. Corte de los hexaedros fabricados con diferentes velocidades de movimiento del robot. a) Hexaedro completo fabricado con la velocidad nominal de 20 mm/s; b) incremento de velocidad del 20%, 24 mm/s; c) incremento de velocidad del 10%, 22 mm/s; d) velocidad nominal, 20 mm/s; e) reducción de velocidad del 10%, 18 mm/s; f) reducción de velocidad del 20%, 16 mm/s.

7.4.2.1.2. Corrección de defectos

Aunque en el apartado anterior se demostró que fue posible aportar material con un cambio del 20% en la velocidad del robot, en este caso se limitó al 10% de la velocidad nominal, de cara a suavizar las correcciones y asegurar la calidad interna de la pieza. Por lo tanto, el valor de v_{max} fue fijado en 22 mm/s y el de v_{min} en 18 mm/s. La máxima desviación a partir de la cual se saturan las velocidades, $desv_{max}$, fue fijada en 1 mm.

En la primera geometría (Figura 127) se simuló un defecto escalón. Tras el aporte de una capa completa inicial, en la segunda capa, únicamente se aportó la mitad de la sección. De esta forma, se produjo una capa con diferentes alturas como puede verse en la Figura 127a. Este defecto pretendió simular las desviaciones de altura

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

que pueden darse durante la fabricación de una pieza con unos parámetros no óptimos. A continuación, se aplicó la estrategia de corrección y tras varias capas se restauró una superficie superior plana (Figura 127b). La Figura 127c muestra los perfiles de altura calculados para cada capa escaneada, resaltando el defecto escalón provocado en la segunda capa aportada. Finalmente, la Figura 127d presenta las medidas de altura a ambos lados del defecto escalón evidenciando la efectividad del control de altura. En la segunda capa se observa la diferencia de altura entre el lado izquierdo (azul) y el lado derecho (rojo) provocada por el defecto escalón. A medida que se aportaron más capas, la diferencia entre lados disminuyó hasta reducirse por completo en la duodécima capa.

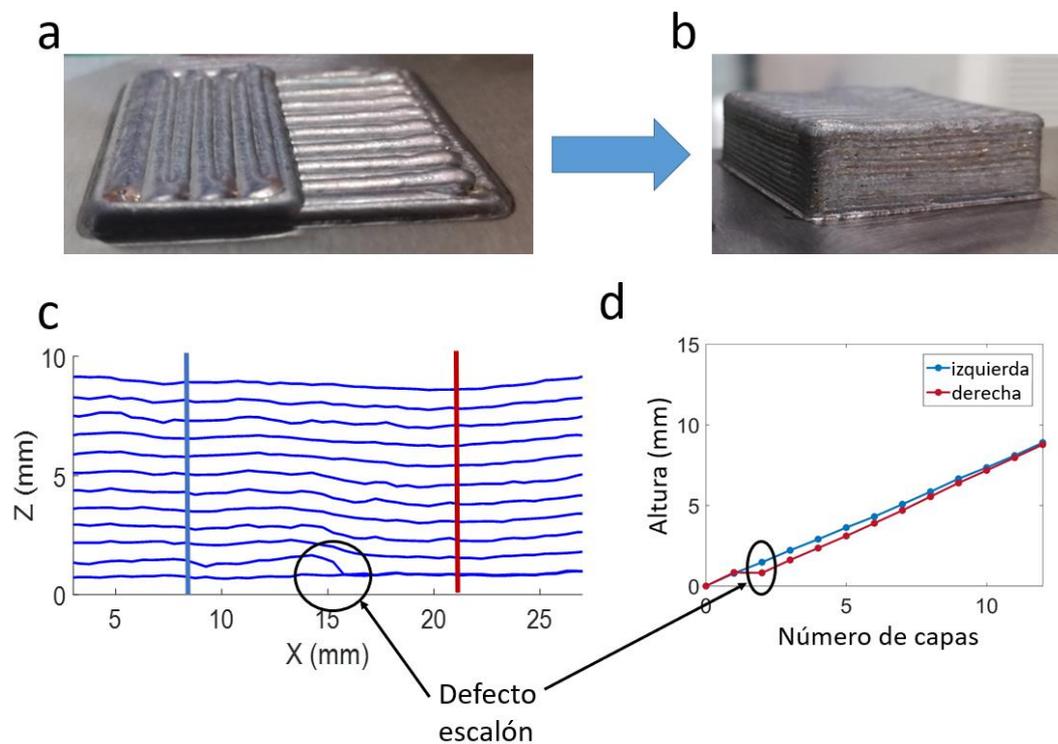


Figura 127. Corrección de defecto escalón con la estrategia de control de altura. a) Defecto escalón provocado; b) pieza tras la aplicación de la corrección; c) perfil de altura para cada capa aportada; d) evolución de la altura de la pieza a ambos lados del defecto.

En el segundo demostrador (Figura 128a) se generó un defecto tipo cajera. De nuevo, el resultado de la pieza tras la aplicación del control es mostrado en la Figura 128b, en la que se presenta una superficie final plana. En este caso, el defecto provocado consistió en una diferencia de dos capas entre las primeras capas aportadas, como puede observarse en la Figura 128c. La evolución del error de altura en el centro de la pieza en contraste con uno de los lados es graficada en la Figura 128d. En este caso la diferencia de altura tras el aporte de la tercera capa fue

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

mayor por lo que no fue hasta la decimonovena capa cuando se niveló la altura de la superficie.

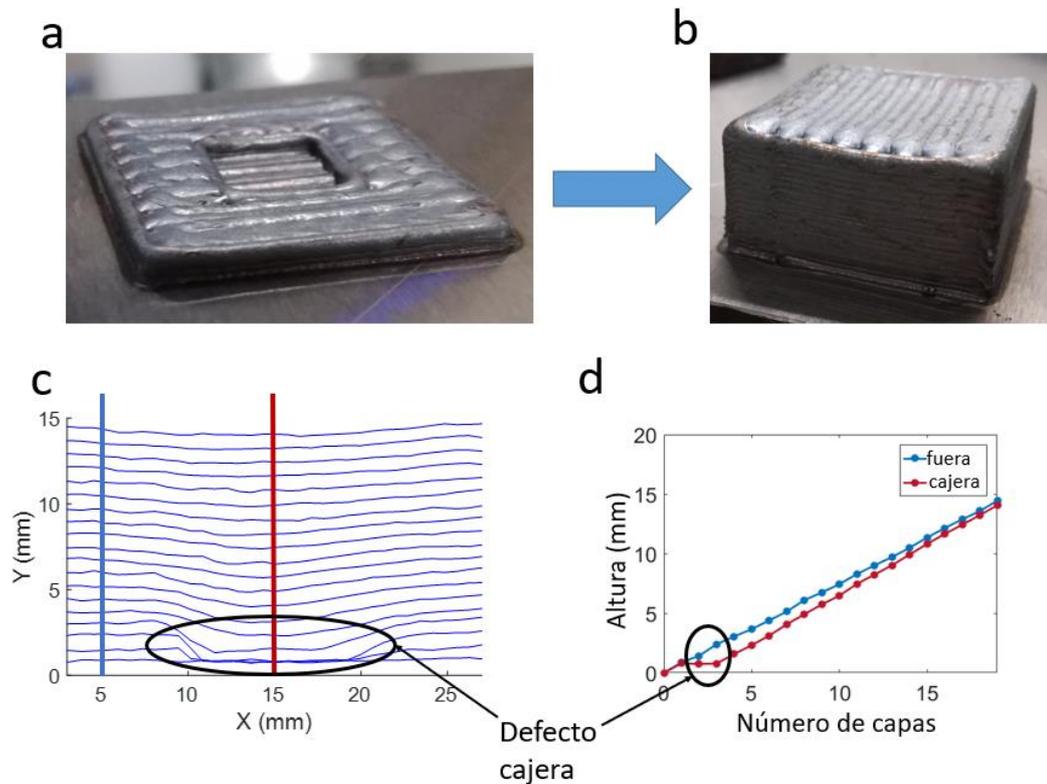


Figura 128. Corrección de defecto cajera con la estrategia de control de altura. a) Defecto cajera provocado; b) pieza tras la aplicación de la corrección; c) perfil de altura para cada capa aportada; d) evolución de la altura de la pieza en el centro de la cajera y a un lado de la pieza, fuera de la cajera.

De cara a verificar que el control de altura se aplicó sin comprometer la integridad de la pieza, las piezas fueron cortadas para analizar posibles defectos internos, especialmente en las capas iniciales donde se generó el defecto. La Figura 129 presenta una vista detallada de la corrección del defecto en la que se pueden distinguir incluso el solapamiento de los cordones individuales a medida que estos son aportados. Tanto en el caso de la corrección del defecto escalón como en el del defecto cajera, no se apreciaron defectos internos como poros, faltas de unión o grietas.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

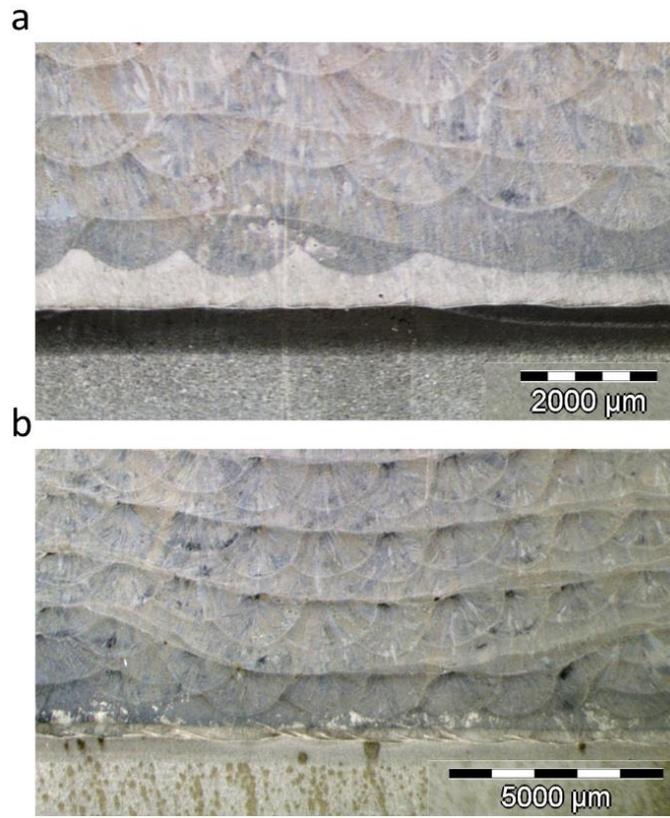


Figura 129. Cortes de las piezas mostrando una vista detallada de la corrección de los defectos provocados y el solapamiento entre cordones. a) Corrección del defecto escalón; b) corrección del defecto cajera.

7.4.2.2. *Caso 2: pieza de demostración*

La pieza de la Figura 130 fue fabricada en una atmosfera controlada libre de oxígeno. Para mantener controlado el valor de contenido de oxígeno en la cámara de atmosfera inerte se mantuvo el flujo de argón durante el proceso completo de fabricación, conservando un contenido de oxígeno menor de 20 ppm. Como puede observarse, al contrario que las piezas fabricadas sin atmosfera controlada, en estas condiciones la superficie de la pieza tuvo un acabado brillante, debido a la ausencia de oxidación superficial.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

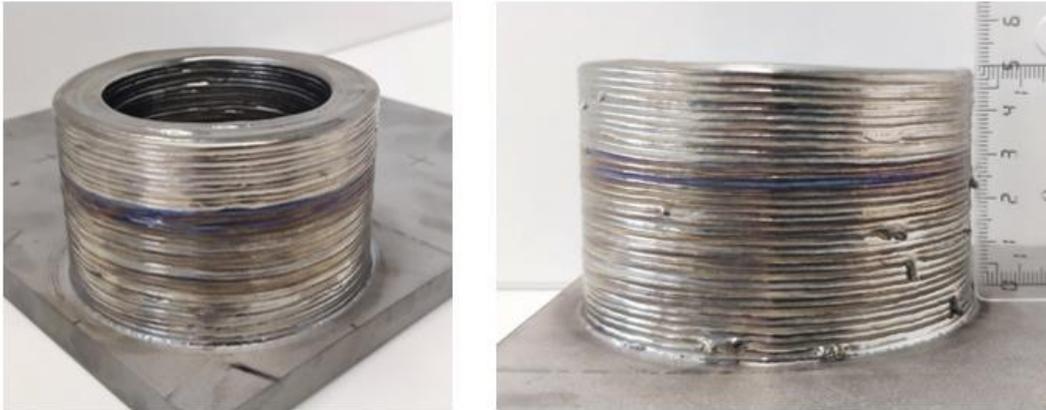


Figura 130. Pieza cilíndrica fabricada mediante LMD con aporte de hilo de titanio Ti6Al4V en atmosfera controlada de argón.

El resultado del escaneo de la capa superior de la pieza es mostrado en la Figura 131, donde la escala de colores corresponde con el crecimiento de la pieza y su desviación respecto de la altura de pieza teórica.

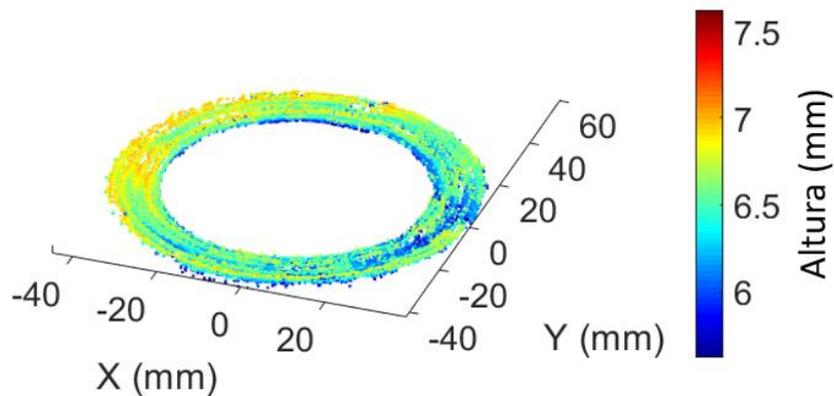


Figura 131. Escaneo de la capa superior en una etapa intermedia de la fabricación del cilindro fabricado dentro de la cámara de atmosfera inerte.

Aunque el escaneo de la capa superior de la pieza presenta cierto ruido en la medida, fue empleado para realizar un control de altura sobre la pieza mediante la metodología descrita en este apartado. En la Figura 132 se ilustra mediante la escala de colores la velocidad introducida en los movimientos del robot con aporte de material. El valor nominal de la velocidad fue en este caso de 14,5 mm/s y se introdujeron variaciones del 10% en la velocidad consignada en función de la altura medida en la pieza. De esta forma, fue posible fabricar la pieza controlando las desviaciones de altura en la superficie superior durante el proceso completo de

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

fabricación, dando lugar a una superficie superior plana como queda probado en la Figura 132.

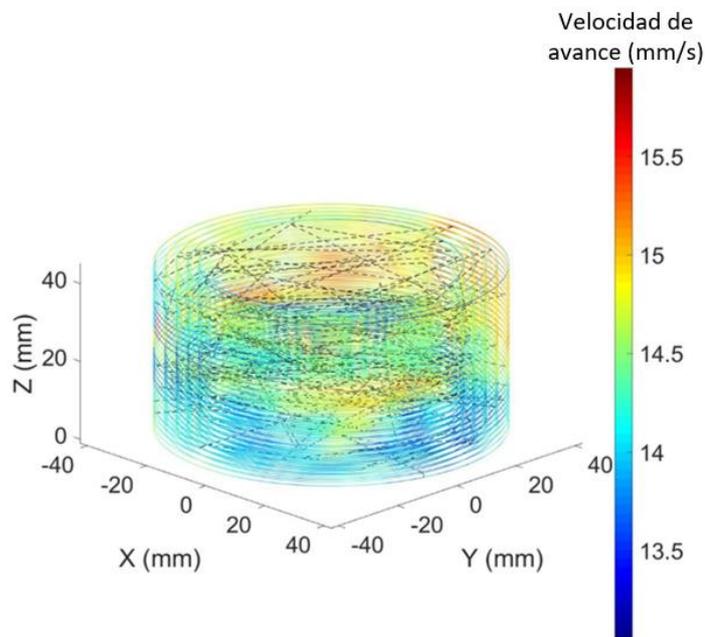


Figura 132. Velocidad de avance del robot introducido en cada movimiento de aporte resultado de la aplicación del control de altura presentado en el apartado 7.4.

7.4.3. Conclusiones

En este apartado se ha presentado una metodología para el control de la altura de aporte que divide su actuación en dos etapas. Por un lado, se aprovechó la estrategia desarrollada en el apartado 7.3 para realizar una corrección de la altura media de la capa y generar las trayectorias para la capa siguiente. Adicionalmente, se añadió la capacidad de realizar correcciones locales dentro de la capa, pudiendo actuar sobre la altura de la capa de forma local a través de la modificación de la tasa de aporte en cada punto.

La actuación del control se probó sobre dos casos fabricados por LMD-W. Por un lado, se provocaron defectos que posteriormente fueron reparados recuperando la planitud de la superficie superior de la pieza. El control de la altura de la pieza se basó en la variación de la velocidad del robot en función de la altura medida en los escaneos. El efecto de la variación de la velocidad sobre el crecimiento de la pieza fue probado sobre diversas probetas en las que se comprobó su integridad. De este modo la eficacia del control de altura fue validada y se comprobó la ausencia de defectos internos o faltas de unión en los demostradores finales. El recálculo de las trayectorias durante el proceso y la combinación de la corrección de la altura media

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

de la pieza y las correcciones locales dentro de la capa resultaron en un método fiable y adecuado para su inserción en entorno de fabricación DED.

Por otro lado, la metodología de control de altura se aplicó sobre una pieza cuya particularidad consistió en que su acabado fue brillante a causa de la fabricación en atmosfera controlada. Mientras que la medida tuvo cierto ruido, fue posible realizar un control de altura escaneando únicamente la superficie superior de la pieza en diferentes etapas de la fabricación.

7.5. Conclusiones

Este capítulo ha introducido tres estrategias de control de altura aplicadas sobre el proceso LMD con aporte de polvo e hilo metálico. Mediante su aplicación, ha sido posible mantener la distancia entre la boquilla de aporte y la pieza en un valor óptimo. Esto ha permitido mantener la estabilidad del proceso y, en el caso del LMD-P, optimizar la eficiencia de atrapamiento de polvo y la tasa de aporte de material.

Cada metodología de control de altura ha implicado una etapa de calibración previa, de tal forma que determinar únicamente la altura de la pieza ha requerido de un sistema de coordenadas con origen en la base del escaneo, mientras que para aplicar correcciones locales en la pieza ha sido necesario transformar las nubes de puntos adquiridas por el escáner al sistema de coordenadas de fabricación. Mientras que la aplicación de correcciones locales implica una mayor complejidad de calibración del sistema de medida y de ajuste de los parámetros de control, puede ser necesaria en el caso de geometrías complejas cuyo crecimiento sea desigual en cada zona de la pieza.

Igualmente, se ha presentado una metodología para el cálculo de las trayectorias de forma adaptativa. De esta forma, en lugar de generar las trayectorias de aporte de toda la pieza previamente a la fabricación, estas han sido calculadas por grupos tras el escaneo de las piezas. Por lo tanto, ha sido posible ajustar parámetros como la altura de pieza real, donde debe aportar material el robot, o la altura de capa teórica. La fabricación ha sido realizada en un lazo cerrado en el que se ha aportado un grupo de capas, se ha medido la superficie superior de la pieza con el sistema de medida tridimensional, se ha determinado la altura y se han calculado las trayectorias de aporte del siguiente grupo de capas a aportar, ajustado los parámetros en función del crecimiento real de la pieza.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Por otro lado, puesto que la medida geométrica ha sido realizada entre el aporte de las capas, se ha tratado de una medida realizada in-line. Sin embargo, existe un gran interés en introducir medidas geométricas in-situ, es decir, durante el aporte. Este aspecto, aún por resolver por las limitaciones de los equipos comerciales para realizar medidas precisas cerca del baño fundido, reduciría el tiempo de fabricación y evitaría afectar los ciclos de enfriamiento y calentamiento de la pieza y, por lo tanto, a la microestructura resultante. En cualquier caso, las metodologías de control de altura desarrolladas podrían ser aplicadas a medidas geométricas de la pieza alternativas.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Capítulo 8. Conclusiones y líneas futuras

8.1. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, la principal conclusión es que se ha logrado desarrollar una metodología de monitorización y control geométrico del proceso LMD que permite aumentar la estabilidad del proceso y asegurar la fabricación de las piezas. De esta forma, el tiempo y coste de la fabricación de un componente se ven reducidos sustancialmente y la calidad de las piezas es superior. Concretamente, los aspectos que se han desarrollado son los siguientes:

- Los sistemas de medida basados en la proyección de luz estructurada han sido apropiados para realizar el control geométrico de las piezas ya que ofrecen una gran cantidad de medidas sobre la pieza, de una manera ágil y sin contacto.
- Se han evaluado varias configuraciones de estos escáneres, ya sea colocados en posición fija o montados en el cabezal, y se han aplicado los métodos de calibración adecuados en cada caso, para transformar la información de los escaneos a un formato que permite realizar correcciones directas sobre el proceso.
- Con la información obtenida del digitalizado tridimensional se han desarrollado tres métodos diferentes para el control de altura, los cuales se han validado en dos variantes del proceso de aporte, LMD-P y LMD-W. Así, los parámetros de entrada del proceso han sido adaptados para obtener un resultado adecuado en la fabricación. Algunos de estos parámetros que han sido controlados son la altura de capa, el ajuste de la posición del robot al crecimiento real de la pieza o la variación de la tasa de aporte de material en función de la altura local en cada zona de la pieza.
- La medida de las piezas y las correcciones han sido introducidas de manera automática durante el proceso, gracias a los protocolos de comunicación entre los diferentes sistemas de fabricación y de monitorización y control. De esta forma, es posible aplicar las metodologías de control de una manera automática sin afectar al adecuado ritmo de producción.
- Se han planeado soluciones para un control dimensional de la pieza en las etapas intermedias de la fabricación. Así, es posible realizar una comparativa entre la geometría teórica y la fabricación, detectando las

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APOORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

posibles distorsiones geométricas que pueden dar lugar a un fallo de la fabricación.

- Los desarrollos mencionados han sido empaquetados en una aplicación informática de tal forma que se facilita la incorporación de los sistemas de monitorización y control en una potencial aplicación industrial.

8.2. Contribuciones científicas a revistas y congresos internacionales

Con los resultados de los desarrollos de esta tesis se han publicado los artículos de investigación mostrados en la Tabla 16. Estos artículos son recogidos en los diferentes anexos de este trabajo.

Título	Autores	Año	DOI	Revista / Congreso	Índice impacto JCR 2019 - Cuartil (Categoría)
Structured light-based height control for laser metal deposition [137]	I. Garmendia, J. Pujana, A. Lamikiz, M. Madarieta, J. Leunda	2019	10.1016/j.mapro.2019.04.018	Journal of Manufacturing Processes	4,086 - Q2 (Engineering, Manufacturing)
Development of an Intra-Layer Adaptive Toolpath Generation Control Procedure in the Laser Metal Wire Deposition Process [138].	I. Garmendia, J. Pujana, A. Lamikiz, J. Flores, M. Madarieta	2019	10.3390/materials12030352	Materials	3,057 - Q2 (Materials Science, Multidisciplinary)
In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning [139]	I. Garmendia, J. Leunda, J. Pujana, A. Lamikiz	2018	10.1016/j.procir.2017.12.098	Procedia CIRP / Conference on Electro Physical and Chemical Machining	-
Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts [140].	I. Garmendia, J. Flores, M. Madarieta, A. Lamikiz, L. Uriarte, C. Soriano	2020	10.1016/j.procir.2020.09.158	Procedia CIRP LANE Conference on Photonic Technologies	-

Tabla 16. Artículos de investigación publicados con los resultados de la tesis.

Por otro lado, aunque no estén directamente alineados con los objetivos de la tesis, la línea de fabricación aditiva de Tekniker ha generado un conocimiento del proceso

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

LMD y de herramientas auxiliares al proceso contribuyendo mediante las publicaciones de la Tabla 17 a diversas revistas y congresos internacionales.

Título	Autores	Año	DOI	Revista / Congreso	Índice impacto JCR 2019 - Cuartil (Categoría)
Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique	J. Flores, I. Garmendia , J. Pujana	2019	10.1007/s00170-018-3124-1	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	2,633 - Q2 (Engineering, Manufacturing)
Thermal monitoring and control by infrared camera in the manufacture of parts with laser metal deposition	J. Flores, I. Garmendia , I. Cabanes	2020	10.6036/9379	DYNA Ingeniería e industria	0,945 - Q4 (Engineering, Multidisciplinary)
Comparative study of laser metal deposition (LMD) of coaxial wire and powder in the manufacture of Ti-6Al-4V structures	M. Madarieta, J. Leunda, I. Garmendia , C. Soriano	2020	10.6036/9378	DYNA Ingeniería e industria	0,945 - Q4 (Engineering, Multidisciplinary)
Additive Manufacturing of metal components using concentric-wire Laser Metal Deposition	J. Pujana, M. Madarieta, I. Garmendia , C. Soriano, J. Leunda	2018	10.6036/8819	DYNA Ingeniería e industria	0,945 - Q4 (Engineering, Multidisciplinary)
Study of the Geometrical Limitations Associated to the Metallic Part Manufacturing by the LMD Process	L. Arregui, I. Garmendia , J. Pujana, C. Soriano	2018	10.1016/j.procir.2017.12.096	Procedia CIRP / Conference on Electro Physical and Chemical Machining	-

Tabla 17. Otros artículos de investigación publicados por la línea de fabricación aditiva de Tekniker.

8.3. Futuras líneas de trabajo

Mientras que este trabajo supone un avance que puede contribuir a la industrialización del proceso LMD, existen todavía aspectos que deben ser tratados y que se plantean como futuras líneas de trabajo.

En primer lugar, es necesario evaluar nuevos sensores de medida adaptados a las condiciones del proceso LMD. Algunos de los aspectos a estudiar son la incorporación de una medida geométrica in-situ de los cordones aportados, la digitalización de superficies sometidas a altas temperaturas o la mejora de la precisión en el digitalizado de superficies con un acabado brillante.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Igualmente, la aparición de nuevos sistemas y principios de medida hacen necesarios también nuevos desarrollos de software, por lo que se trabajará en las metodologías que permiten aplicar de una manera robusta y ágil correcciones sobre el proceso. Así mismo, la gran cantidad de información generada por los diferentes sistemas de monitorización requiere del desarrollo de una base de datos para almacenar y procesar toda la información obtenida durante la fabricación de las piezas de una manera eficiente y segura.

Por otro lado, las tecnologías de monitorización y control pueden contribuir, junto con el conocimiento del proceso, a obtener piezas libres de defectos con cierta fiabilidad. Para ello, es importante trabajar en técnicas de predicción de defectos o de la microestructura resultante, basados en metodologías de aprendizaje de máquina, adaptados al proceso LMD. En esta misma línea, la inspección de la integridad de las piezas se realiza tras la fabricación de las piezas. Sin embargo, podrían desarrollarse sistemas de inspección en proceso que evalúen la integridad de la pieza basadas, por ejemplo, en la propagación de ultrasonidos o rayos X.

Por último, a lo largo de este trabajo se han realizado diferentes demostradores para validar la aplicación de las técnicas de monitorización y control. El paso inmediato consiste en verificar su aplicación en piezas de mayor tamaño y complejidad geométrica y su integración en sectores industriales como el aeronáutico, aeroespacial o energético. La digitalización de la geometría de las piezas juega un papel importante, tanto en la adecuada fabricación de la pieza como asistiendo a las operaciones de acabado posteriores. Por lo tanto, las metodologías de monitorización y control deberían acelerar esta integración, garantizando la calidad final de las piezas fabricadas y facilitando el proceso de aporte y post-procesado.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Bibliografía

- [1] M. Munsch, M. Schmidt-Lehr, E. Wycisk, “AMPOWER REPORT 2020. Metal Additive Manufacturing Management Summary,” 2020.
- [2] S. K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. K. Leach, A. T. Clare, “Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing,” *Mater. Des.*, vol. 95, pp. 431–445, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.099.
- [3] P. M. Sequeira Almeida, “Process control and development in wire and arc additive manufacturing,” 2012.
- [4] “Norsk Titanium: THE FUTURE OF MANUFACTURING IS RAPID PLASMA DEPOSITION.” <https://www.norsktitanium.com/> (accedido el 11/02/2021).
- [5] M. Gilani, D. Körpe, “Airline Weight Reduction to Minimize Direct Operating Cost,” 2019.
- [6] P. Basiliere, M. Shanler, “Hype Cycle for 3D Printing,” 2019. <https://www.gartner.com/en/documents/3947508/hype-cycle-for-3d-printing-2019> (accedido el 11/02/2021).
- [7] P. A. Kobryn, N. . R. Ontko, L. . P. Perkins, J. S. Tiley, “Additive Manufacturing of Aerospace Alloys for Aircraft Structures,” 2006. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA521726> (accedido el 11/02/2021).
- [8] A. Heralić, A.-K. Christiansson, B. Lennartson, “Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 9, pp. 1230–1241, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.03.016>.
- [9] “CLAMIR,” *Sistema para control en lazo cerrado de potencia láser en procesos LMD y cladding*. <https://www.clamir.com/> (accedido el 11/02/2021).
- [10] T. Purtonen, A. Kalliosaari, A. Salminen, “Monitoring and adaptive control of laser processes,” *Phys. Procedia*, vol. 56, pp. 1218–1231, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.038>.
- [11] M. Mani, B. M. Lane, M. A. Donmez, S. C. Feng, S. P. Moylan, “Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes,” 2016. doi: 10.1080/00207543.2016.1223378.
- [12] B. M. Sharratt, “Non-Destructive Techniques and Technologies for Qualification of Additive Manufactured Parts and Processes: A Literature Review,” 2015.
- [13] E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin, *Laser Cladding*. CRC press, 2004.
- [14] D. Thomas, S. Gilbert, “Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing,” *NIST Spec. Publ.*, vol. 1176, pp. 1–77, 2014, doi: 10.6028/NIST.SP.1176.
- [15] J. Allen, “An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts,” *Cost Eff. Manuf. via Net Shape Process.*, pp. 17-1-17–10, 2006, doi: 10.14339/RTO-MP-AVT-139-17.
- [16] “Additive manufacturing -- General principles -- Terminology,” *ISO/ASTM 52900:2015*, 2015.
- [17] Addilan, “Sectores.” <https://www.addilan.com/sectores/> (accedido el 11/02/2021).
- [18] “RAMLAB: METAL PARTS ON DEMAND.” <https://ramlab.com/> (accedido el 11/02/2021).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- [19] “GEFERTEC: The 3DMP® process chain.” <https://www.gefertec.de/en/3dmp-process/#lichtbogenschweissverfahren> (accedido el 11/02/2021).
- [20] A. Garcia Colomo, D. Wood, F. Martina, S. Williams, “A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications,” *Int. J. Rapid Manuf.*, vol. 9, no. 3, p. 1, 2020, doi: 10.1504/ijrapidm.2020.10019230.
- [21] Sciaky, “EB WELDING SYSTEMS.” <https://www.sciaky.com/eb-welding-systems/electron-beam-welding-solutions> (accedido el 11/02/2021).
- [22] “Cambridge Vacuum Engineering (CVE).” <https://www.camvaceng.com/> (accedido el 11/02/2021).
- [23] “Steigerwald Strahltechnik (SST).” <https://www.sst-ebeam.com/en/> (accedido el 11/02/2021).
- [24] Trumpf, “Laser Metal Fusion (LMF).” https://www.trumpf.com/es_ES/aplicaciones/fabricacion-aditiva/laser-metal-fusion-lmf/ (accedido el 11/02/2021).
- [25] K. Zhang, W. Liu, X. Shang, “Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 39, no. 3, pp. 549–557, 2007, doi: 10.1016/j.optlastec.2005.10.009.
- [26] Y. Sun, M. Hao, “Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 7, pp. 985–995, 2012, doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.018.
- [27] S. Liu, R. Kovacevic, “Statistical analysis and optimization of processing parameters in high-power direct diode laser cladding,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 74, no. 5–8, pp. 867–878, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6041-y.
- [28] P. Peyre, P. Aubry, R. Fabbro, R. Neveu, A. Longuet, “Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 2, 2008, doi: 10.1088/0022-3727/41/2/025403.
- [29] PRECITEC, “Cladding head YC52 - basic model.” <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yc52/> (accedido el 11/02/2021).
- [30] Trumpf, “Laser metal deposition Tapping new potential with deposition techniques.” https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Applications/Broschueres/TRUMPF-laser-metal-deposition-EN.pdf (accedido el 11/02/2021).
- [31] J. I. Arrizubieta, J. E. Ruiz, S. Martinez, E. Ukar, A. Lamikiz, “Intelligent nozzle design for the Laser Metal Deposition process in the Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 1237–1244, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.043.
- [32] E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger, C. Leyens, “Deposition of Ti – 6Al – 4V using laser and wire , part I : Microstructural properties of single beads,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 206, no. 6, pp. 1120–1129, 2011, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.095.
- [33] M. Schulz, F. Klocke, J. Riepe, N. Klingbeil, K. Arntz, “Process Optimization of Wire-Based Laser Metal Deposition of Titanium,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 141, no. 5, p. 052102, 2018, doi: 10.1115/1.4041167.
- [34] Y. Ding, M. Akbari, R. Kovacevic, “Process planning for laser wire-feed metal additive manufacturing system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, no. 1–4, pp. 355–365, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1179-z.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- [35] S. Ocylok, M. Leichnitz, S. Thieme, S. Ocylok, "Investigations on laser metal deposition of stainless steel 316L with coaxial wire feeding," *9th Int. Conf. Photonic Technol. LANE*, pp. 1–4, 2016.
- [36] M. Motta, A. G. Demir, "High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition," *Addit. Manuf.*, vol. 22, pp. 1–18, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.043.
- [37] J. Kelbassa, A. Gasser, J. Bremer, O. Pütsch, R. Poprawe, J. Henrich Schleifenbaum, "Equipment and process windows for laser metal deposition with coaxial wire feeding," *J. Laser Appl.*, vol. 31, no. 2, p. 022320, 2019, doi: 10.2351/1.5096112.
- [38] M. Wu, S. Shi, G. Fu, Y. Liu, "Process Parameters Control of Deposition of Hollow Cylindrical Part with Internal Wire Feeding through a Hollow Laser Beam," vol. 419, pp. 305–309, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.419.305.
- [39] W. Yong-kang, S. H. I. Shihong, F. U. Geyan, L. I. Chun-sheng, "Research on the Key Process Parameters in Direct Laser Deposition Using Coaxial Inside-Beam Wire Feeding," vol. 43, pp. 401–404, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.43.401.
- [40] S. Jianjun, Z. Ping, F. Geyan, S. Shihong, "Geometry characteristics modeling and process optimization in coaxial laser inside wire cladding," *Opt. Laser Technol.*, vol. 101, pp. 341–348, 2018, doi: 10.1016/j.optlastec.2017.10.035.
- [41] A. Kuznetsov, A. Jeromen, E. Govekar, "Droplet detachment regimes in annular laser beam droplet generation from a metal wire," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 225–228, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.051.
- [42] M. Kotar, E. Govekar, "The influence of the workpiece illumination proportion in annular laser beam wire deposition process," *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 228–232, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.100.
- [43] M. Bambach, I. Sizova, F. Silze, M. Schnick, "Comparison of laser metal deposition of Inconel 718 from powder, hot and cold wire," *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 206–209, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.095.
- [44] S. Williams, "Wire & Arc Additive Manufacture-Current and Future Developments," *Cranfield University: UK*, 2016. <http://www.waammat.com> (accedido el 11/02/2021).
- [45] Q. Wu *et al.*, "Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 32, no. 16, pp. 1881–1886, 2017, doi: 10.1080/10426914.2017.1364860.
- [46] J. I. Arrizubieta, F. Klocke, N. Klingbeil, K. Arntz, A. Lamikiz, S. Martinez, "Evaluation of efficiency and mechanical properties of Inconel 718 components built by wire and powder Laser Material Deposition," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 6, pp. 965–972, 2016.
- [47] M. Madarieta, J. Pujana, I. Garmendia, J. Leunda, "Additive Manufacturing of metal components using concentric-wire Laser Metal Deposition," *DYNA Ing. E Ind.*, pp. 1–10, 2018, doi: <https://doi.org/10.6036/8819>.
- [48] R. G. Holdich, *Fundamentals of particle technology*. Midland Information Technology and Publishing, 2002.
- [49] Sciaky, "Advantages of Wire AM vs. Powder AM." <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am> (accedido el 11/02/2021).
- [50] J. C. Haley, B. Zheng, U. S. Bertoli, A. D. Dupuy, J. M. Schoenung, E. J. Lavernia, "Working distance passive stability in laser directed energy deposition additive manufacturing," *Mater. Des.*, vol. 161, pp. 86–94, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.11.021.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- [51] G. Zhu, D. Li, A. Zhang, G. Pi, Y. Tang, “The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 44, no. 2, pp. 349–356, 2012, doi: 10.1016/j.optlastec.2011.07.013.
- [52] P. Henri, N. Jonne, T. Sebastian, T. Jari, N. Steffen, V. Petri, “LASER CLADDING WITH COAXIAL WIRE FEEDING,” pp. 1196–1201.
- [53] OPTOMECH, “Optomech LENS systems.” <https://www.optomech.com/3d-printed-metals/lens-printers/> (accedido el 11/02/2021).
- [54] POM Group DM3D, “DMD Machines Solutions.” http://www.pomgroup.com/index.php?option=com_content&view=article&id=215&Itemid=918 (accedido el 11/02/2021).
- [55] BeAM, “Manufacturer of DED Additive Solutions.” <https://www.beam-machines.com/> (accedido el 11/02/2021).
- [56] “IBARMIA, ADDITIVE MANUFACTURING AND MULTITASKING MACHINING IN THE SAME MACHINE.” <https://www.ibarmia.com/en/today/ibarmia-additive-manufacturing-multitasking> (accedido el 11/02/2021).
- [57] H. Reichenbacher, “HYBRID MANUFACTURING.” <https://www.hamuel.de/en/produkte/hstm/hybrid/index.php> (accedido el 11/02/2021).
- [58] DMG Mori, “LASERTEC 65 3D hybrid.” <https://es.dmgmori.com/productos/maquinas/additive-manufacturing/boquilla-de-polvo/lasertec-65-3d-hybrid> (accedido el 11/02/2021).
- [59] Mazak, “INTEGREX i-400 AM.” <https://www.mazakusa.com/es/machines/integrex-i-400am/> (accedido el 11/02/2021).
- [60] Y. Ding, R. Dwivedi, R. Kovacevic, “Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 44, pp. 67–76, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2016.08.008.
- [61] “KRAKEN Project. European Union’s Horizon 2020 Research and Innovation Programme (grant agreement No 723759).” <https://krakenproject.eu/> (accedido el 11/02/2021).
- [62] “Integrated CAM solutions and services from SKM.” <https://www.skm-informatik.com/skm/cam/cam-overview.html> (accedido el 11/02/2021).
- [63] S. NX, “Transformación digital de la producción de piezas mediante NX para el sector de la fabricación.” <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/nx/nx-for-manufacturing.html> (accedido el 11/02/2021).
- [64] Bezzier, “Autodesk PowerMILL Additive.” https://www.bezzier.com/fabricacion/lineas-de-trabajo/fabricacion-aditiva_13_1_ap.html (accedido el 11/02/2021).
- [65] E. R. Denlinger, J. C. Heigel, P. Michaleris, T. A. Palmer, “Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 215, pp. 123–131, 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.030.
- [66] E. Foroozmehr, R. Kovacevic, “Effect of path planning on the laser powder deposition process: Thermal and structural evaluation,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 51, no. 5–8, pp. 659–669, 2010, doi: 10.1007/s00170-010-2659-6.
- [67] K. Dai, L. Shaw, “Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 5, pp. 270–276, 2002, doi: 10.1108/13552540210451732.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- [68] M. Teli, F. Klocke, K. Arntz, K. Winands, N. Klingbeil, J. I. Arrizubieta, "Overlap Ratio in Wire- and Powder-Based Laser Metal Deposition of H11 + Nb for Hot Forging Dies," *Solid State Phenom.*, vol. 278, pp. 28–38, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.278.28.
- [69] F. Spranger, B. Graf, M. Schuch, K. Hilgenberg, M. Rethmeier, "Build-up strategies for additive manufacturing of three dimensional Ti-6Al-4V-parts produced by laser metal deposition," *J. Laser Appl.*, vol. 30, no. 2, p. 022001, 2018, doi: 10.2351/1.4997852.
- [70] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, "A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 1–4, pp. 173–183, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5808-5.
- [71] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, "A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 34, pp. 8–19, 2015, doi: 10.1016/j.rcim.2015.01.003.
- [72] Q. Tang, S. Yin, Y. Zhang, J. Wu, "A tool vector control for laser additive manufacturing in five-axis configuration," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 98, no. 5–8, pp. 1671–1684, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2177-5.
- [73] Y. Nilsiam, P. Sanders, J. M. Pearce, "Slicer and process improvements for open-source GMAW-based metal 3-D printing," *Addit. Manuf.*, vol. 18, pp. 110–120, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.10.007.
- [74] Y. Jin, Y. He, G. Fu, A. Zhang, J. Du, "A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 48, no. August 2016, pp. 132–144, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2017.03.008.
- [75] Y. an Jin, Y. He, J. zhong Fu, W. feng Gan, Z. wei Lin, "Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology," *Addit. Manuf.*, vol. 1, pp. 32–47, 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.004.
- [76] G. Q. Jin, W. D. Li, L. Gao, "Robotics and Computer-Integrated Manufacturing An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing," vol. 29, pp. 23–38, 2013, doi: 10.1016/j.rcim.2012.07.001.
- [77] K. Lee, H. Jee, "Slicing algorithms for multi-axis 3-D metal printing of overhangs," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 12, pp. 5139–5144, 2015, doi: 10.1007/s12206-015-1113-y.
- [78] D. Boisselier, S. Sankaré, T. Engel, "Improvement of the laser direct metal deposition process in 5-axis configuration," *Phys. Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 239–249, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.168.
- [79] S. Kapil *et al.*, "5-Axis Slicing Methods for Additive Manufacturing Process," *Solid Free. Fabr. Symp.*, 2017.
- [80] J. Ruan, K. Eiamsa-Ard, F. W. Liou, "Automatic process planning and toolpath generation of a multi-axis hybrid manufacturing system," *J. Manuf. Process.*, vol. 7, no. 1, pp. 57–68, 2005, doi: 10.1016/S1526-6125(05)70082-7.
- [81] J. Flores, I. Garmendia, J. Pujana, "Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, pp. 2111–2120, Nov. 2019, doi: 10.1007/s00170-018-3124-1.
- [82] "Integrated metrology definitions," *Manufacturing Metrology Team University of Nottingham*.
<https://www.nottingham.ac.uk/conference/fac-eng/metmap-2019/definitions.aspx> (accedido el 11/02/2021).
- [83] W. J. Seufzer, K. M. Taminger, "Control Methods for the Electron Beam Free Form Fabrication Process," *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 13–21, 2007.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- [84] F. Wang, H. Mao, D. Zhang, X. Zhao, Y. Shen, "Online study of cracks during laser cladding process based on acoustic emission technique and finite element analysis," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, no. 5 PART 2, pp. 3267–3275, 2008, doi: 10.1016/j.apsusc.2008.09.039.
- [85] R. K. Leach, D. Bourell, S. Carmignato, A. Donmez, N. Senin, W. Dewulf, "Geometrical metrology for metal additive manufacturing," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 677–700, 2019.
- [86] G. Bi, A. Gasser, K. Wissenbach, A. Drenker, R. Poprawe, "Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 44, no. 12, pp. 1348–1359, 2006, doi: 10.1016/j.optlaseng.2006.01.009.
- [87] G. Bi, B. Schürmann, A. Gasser, K. Wissenbach, R. Poprawe, "Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 3–4, pp. 555–561, 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.05.010.
- [88] J. Hofman, "Development of an observation and control system for industrial laser cladding," 2009.
- [89] J. T. Hofman, B. Pathiraj, J. Van Dijk, D. F. De Lange, J. Meijer, "A camera based feedback control strategy for the laser cladding process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 11, pp. 2455–2462, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.027.
- [90] S. Ocylok, E. Alexeev, S. Mann, A. Weisheit, K. Wissenbach, I. Kelbassa, "Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring," *Phys. Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 228–238, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.167.
- [91] A. Heralic, A. K. Christiansson, K. Hurtig, M. Ottosson, B. Lennartson, "Control design for automation of robotized laser metal-wire deposition," *IFAC Proc. Vol. 41(2)*, pp. 14785–14791, 2008, doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.2361.
- [92] A. Heralić, A. K. Christiansson, M. Ottosson, B. Lennartson, "Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 4, pp. 478–485, 2010, doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.08.012.
- [93] J. Rodríguez-Araújo, A. Garcia-Diaz, V. Panadeiro, C. Knaak, "Uncooled MWIR PbSe technology outperforms CMOS in RT closed-loop control and monitoring of laser processing," p. ATh2A.2, 2017, doi: 10.1364/aio.2017.ath2a.2.
- [94] P. Colodrón, J. Fariña, J. J. Rodríguez-Andina, F. Vidal, J. L. Mato, M. Á. Montealegre, "FPGA-based measurement of melt pool size in laser cladding systems," *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 1503–1508, 2011, doi: 10.1109/ISIE.2011.5984383.
- [95] D. Hu, H. Mei, G. Tao, R. Kovacevic, "Closed loop control of 3d laser cladding based on infrared sensing," *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 129–137, 2001.
- [96] D. Hu, R. Kovacevic, "Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 1, pp. 51–60, 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(02)00163-3.
- [97] S. J. Altenburg, C. Maierhofer, A. Straße, A. Gumenyuk, "Comparison of MWIR thermography and high-speed NIR thermography in a laser metal deposition (LMD) process," no. Lmd, pp. 1–5, 2018, doi: 10.21611/qirt.2018.p35.
- [98] M. Doubenskaia, M. Pavlov, S. Grigoriev, I. Smurov, "Definition of brightness temperature and restoration of true temperature in laser cladding using infrared camera," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 220, pp. 244–247, 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.10.044.
- [99] I. Smurov, M. Doubenskaia, S. Grigoriev, A. Nazarov, "Optical monitoring in laser cladding

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- of Ti6Al4V,” *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 21, no. 6, pp. 1357–1362, 2012, doi: 10.1007/s11666-012-9808-4.
- [100] I. Smurov, M. Doubenskaia, A. Zaitsev, “Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 220, pp. 112–121, 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.10.053.
- [101] M. Pavlov, D. Novichenko, M. Doubenskaia, “Optical diagnostics of deposition of metal matrix composites by laser cladding,” *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 674–682, 2011, doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.084.
- [102] S. Liu, P. Farahmand, R. Kovacevic, “Optical monitoring of high power direct diode laser cladding,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 64, pp. 363–376, 2014, doi: 10.1016/j.optlastec.2014.06.002.
- [103] L. Song, V. Bagavath-Singh, B. Dutta, J. Mazumder, “Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1–4, pp. 247–256, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3395-2.
- [104] E. Toyserkani, A. Khajepour, “A mechatronics approach to laser powder deposition process,” *Mechatronics*, vol. 16, no. 10, pp. 631–641, 2006, doi: 10.1016/j.mechatronics.2006.05.002.
- [105] A. Fathi, A. Khajepour, E. Toyserkani, M. Durali, “Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 35, no. 3–4, pp. 280–292, 2006, doi: 10.1007/s00170-006-0721-1.
- [106] M. Iravani-Tabrizipour, E. Toyserkani, “An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height,” *Mach. Vis. Appl.*, vol. 18, no. 6, pp. 343–354, 2007, doi: 10.1007/s00138-006-0066-7.
- [107] D. Seltzer, J. L. Schiano, A. R. Nassar, E. W. Reutzel, “Illumination and Image Processing for Real-Time Control of Directed Energy Deposition Additive Manufacturing,” *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 1479–1486, 2016.
- [108] T. A. Davis, Y. C. Shin, “Vision-based clad height measurement,” *Mach. Vis. Appl.*, vol. 22, no. 1, pp. 129–136, 2011, doi: 10.1007/s00138-009-0240-9.
- [109] S. Donadello, M. Motta, A. G. Demir, B. Previtali, “Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation,” vol. 112, pp. 136–144, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.066.
- [110] L. Tang, “Layer-to-Layer Height Control for Laser Metal Deposition Process,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 133, no. April 2011, pp. 473–494, 2011, doi: 10.1115/1.4003691.
- [111] M. Buhr, J. Weber, J.-P. Wenzl, M. Möller, C. Emmelmann, “Influences of process conditions on stability of sensor controlled robot-based laser metal deposition,” *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 149–153, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.067.
- [112] P. Hagqvist, A. Heralić, A. K. Christiansson, B. Lennartson, “Resistance measurements for control of laser metal wire deposition,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 54, pp. 62–67, 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.10.010.
- [113] P. Hagqvist, A. Heralić, A.-K. Christiansson, B. Lennartson, “Resistance based iterative learning control of additive manufacturing with wire,” *Mechatronics*, vol. 31, p., 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.03.008>.
- [114] S. Hölter, R. Noll, “bd-1 SENSOR FOR INLINE MEASUREMENTS DURING LASER MATERIAL DEPOSITION,” 2018. <https://www.ilt.fraunhofer.de> (accedido el 11/02/2021).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- [115] M. Möller, C. Emmelmann, “Quality target-based control of geometrical accuracy and residual stresses in laser metal deposition,” *J. Laser Appl.*, vol. 30, no. 3, p. 032303, 2018, doi: 10.2351/1.5040623.
- [116] G. Turichin, E. Zemlyakov, K. Babkin, S. Ivanov, A. Vildanov, “Analysis of distortion during laser metal deposition of large parts,” *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 154–157, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.068.
- [117] E. Optics, “What is SWIR?,” 2012. <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/what-is-swir/>.
- [118] A. Heralić, “Monitoring and Control of Robotized Laser Metal-Wire Deposition,” 2012.
- [119] P. Hagqvist, “Non-intrusive instrumentation and estimation -Applications for control of an additive manufacturing process,” 2015.
- [120] P. I. Stavroulakis, R. K. Leach, “Stavroulakis, P. I. and Leach, Richard K. (2016) Review of post-process optical form metrology for industrial- grade metal additive manufactured parts . Review of,” vol. 87, 2016, doi: 10.1063/1.4944983.
- [121] N. Pears, Y. Liu, P. Bunting, *3D Imaging, Analysis and Applications*. 2012.
- [122] A. Ghiotti, A. Schoch, A. Salvadori, S. Carmignato, E. Savio, “Enhancing the accuracy of high-speed laser triangulation measurement of freeform parts at elevated temperature,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 64, pp. 499–502, 2015, doi: 10.1016/j.cirp.2015.04.012.
- [123] E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt, G. Metrology, Q. Management, “Metrology of freeform shaped parts,” vol. 56, no. 2, pp. 810–835, 2007, doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.008.
- [124] New Infrared Technologies, “Detectores y sensores de imagen de infrarrojo no refrigerados para la banda MWIR.” <https://www.niteurope.com/> (accedido el 11/02/2021).
- [125] Stratonics, “ThermaViz® Software.” <http://stratonics.com/systems/software/> (accedido el 11/02/2021).
- [126] M. Kogel-Hollacher, “Laser welding using Optical Coherence Tomography,” *Laser User*, no. 92, pp. 26–27, 2019.
- [127] OPTOMECC, “LENS process monitoring and controls.” https://optomec.com/wp-content/uploads/2018/10/LENS_Process_WEB1018.pdf (accedido el 21/10/2020).
- [128] V. Bagavath-Singh, “Part-geometry independent real time closed loop weld pool temperature control system for multi-layer DMD process,” US 8878094 B2, 2014.
- [129] “BeAM machines to integrate In-Process Standoff Distance control in partnership with Precitec and Siemens,” 2019. <https://www.beam-machines.com/press-events/standoffdistance>.
- [130] A. R. Konuk, R. G. K. M. Aarts, A. J. H. t Veld, T. Sibillano, D. Rizzi, A. Ancona, “Process control of stainless steel laser welding using an optical spectroscopic sensor,” *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 744–751, 2011, doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.093.
- [131] “CAVILUX® HF for High-Speed Illumination.” <https://www.cavitar.com/product/cavilux-hf-for-high-speed-illumination/>.
- [132] ABB, “Manual de referencia técnica. Descripción general de RAPID 3HAC050947-005.”.
- [133] B. K. P. Horn, “Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 4, no. 4, p. 629, 1987, doi: 10.1364/josaa.4.000629.
- [134] R. Y. Tsai, “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

- Vision,” *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, Miami Beach, FL*, pp. 364–374, 1986.
- [135] A. C. Brown, D. de Beer, “Development of a stereolithography (STL) slicing and G-Code generation algorithm for an entry level 3-D printer.,” 2013, doi: 10.1109/AFRCON.2013.6757836.
- [136] O. Topçu, Y. Taşcıoğlu, H. Ö. Ünver, “A method for slicing CAD models in binary STL,” in *International Advanced Technologies Symposium*, 2011, no. 163, pp. 141–145.
- [137] I. Garmendia, J. Pujana, A. Lamikiz, M. Madarieta, J. Leunda, “Structured light-based height control for laser metal deposition,” *J. Manuf. Process.*, vol. 42, pp. 20–27, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.018.
- [138] I. Garmendia, J. Pujana, A. Lamikiz, J. Flores, M. Madarieta, “Development of an Intra-Layer Adaptive Toolpath Generation Control Procedure in the Laser Metal Wire Deposition Process,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 352, 2019, doi: 10.3390/ma12030352.
- [139] I. Garmendia, J. Leunda, J. Pujana, A. Lamikiz, “In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning,” *Procedia CIRP*, vol. 68, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.098.
- [140] I. Garmendia, J. Flores, M. Madarieta, A. Lamikiz, L. G. Uriarte, I. Soriano, “Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts,” *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 425–429, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.158.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Anexo 1: Structured light-based height control for laser metal deposition

Artículo en *Journal of Manufacturing Processes* Volume 42, June 2019, Pages 20-27.

Autores: I. Garmendia, J. Pujana, A. Lamikiz, M. Madarieta, J. Leunda.

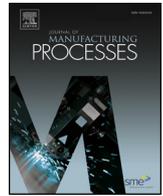
DOI: [10.1016/j.jmapro.2019.04.018](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.018).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Manufacturing Processes

journal homepage: www.elsevier.com/locate/manpro

Structured light-based height control for laser metal deposition

Iker Garmendia^{a,*}, Joseba Pujana^a, Aitzol Lamikiz^b, Mikel Madarieta^a, Josu Leunda^a^a IK4-TEKNIKER, Mechanical Engineering Unit, Iñaki Goenaga 5, Eibar 20600, Spain^b University of the Basque Country, ETSII, Department of Mechanical Engineering, Alameda de Urquijo s/n, Bilbao 48013, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

LMD
Cladding
Monitoring
Control
Wire
Powder

ABSTRACT

This paper describes a closed-loop geometric control method used to adjust deposition trajectories generated during laser metal deposition (LMD) to the height of a part in different building stages. The usual procedure followed in open-loop Additive Manufacturing (AM) processes consists in generating deposition trajectories based on a CAD model to manufacture the entire part and, once finished, the component is measured to be either rejected or accepted according to previously established geometric criteria. However, there are numerous variables and thermal effects affecting part growth that can result in a failed deposition, regardless of whether trajectories were properly defined in the first place. The proposed measuring system features a structured light scanner that obtains the height profile of the most recently deposited layer. Deposition paths to be followed by subsequent layers are calculated according to point cloud treatments. As a result, deposition is adjusted to the growth of the part at each stage of the process to ensure geometric integrity for components and guarantee process efficiency. Height control can be applied satisfactorily to both powder and wire LMD, to reveal any differences and show effects produced by height deviations in each case.

1. Introduction

AM technologies have lately focused more on larger components due to the fact that the aerospace industry has contemplated the option of manufacturing large structural components at a lower cost, compared to forged and machined parts, by building near-net-shape components to be finished at a later stage [1,2]. In fact, large amounts of materials can be saved if deposition is carried out correctly and repetitively.

Compared to other Directed Energy Deposition (DED) technologies such as arc-based manufacturing, LMD has the advantage of delivering good geometrical integrity. Generally speaking, LMD-manufactured components are truer to their original design compared to arc or electron beam-based components. A more accurate control of laser heat input produces less distortion on finished components and provides more efficient processes. Material savings are highly relevant in the aerospace industry as this sector uses expensive materials such as titanium alloys that cause difficulties when processed. Recent improvements in terms of deposition rates [3–5] have demonstrated that is more feasible to use LMD when medium-sized and large functional components have to be manufactured. However, the higher the deposition rates, the lower the fidelity of the geometries that are generated. Consequently, it becomes far more pressing to implement process

control algorithms.

In cases of uncontrolled LMD, deviations occur relative to the expected height and this does not only modify the working distance (WD), but also how the laser and powder jet interfere with the deposition plane. The influence exerted by the laser and powder defocusing with regard to workpiece growth and its final quality was analysed by Zhu et al. [6]. It was demonstrated that quality was better when powder was focused below the substrate. In this situation, and when a local defect appears due to the presence of excessive material (convex), there is less powder concentration and growth. Conversely, when local defects produced by a lack of material (concave) are seen, powder concentration increases and a higher bead is produced. In this manner, height is self-compensated to generate a relatively flat surface. As regards the laser, it was evidenced that, when focused above the surface, a more stable deposition is achieved, although it was found to be far less influential than powder defocusing. Layer growth, however, may vary at different points in the deposition as a function of how much heat accumulates in different sections. In open-loop processes, a theoretical layer height lower than its real growth is entered as a solution to maintain the powder jet focused below the substrate. The downside of this approach is that as part growth is constrained, a large amount of unmelted powder is produced.

As structures must be geometrically and structurally reliable, in-

* Corresponding author.

E-mail address: iker.garmendia@tekniker.es (I. Garmendia).

Table 1
Setup characteristics of the LMD cells for powder and wire supply.

Industrial robot	Material	Material feeding unit	Laser source	Maximum laser power
ABB IRB4400-60	Sulzer Metco 42C stainless steel powder	Sulzer Metco Twin-10C powder feeder	Rofin DY022	2.2kW
ABB IRB4600-45	316LSi stainless steel 0.8 mm diameter wire	DINSE wire feeder	IPG YLS4000 S2T	4 kW

process monitoring and control are required. Dense parts with good mechanical properties and no internal defects in the form of pores or cracks can be obtained [7] when controlled processes are used. Due to the high temperatures reached in the part, contactless sensors are usually employed [8,9]. As regards control systems, some authors have used a CCD, CMOS or IR cameras coaxially to monitor the shape and size of the molten pool [10–16]. This direction-independent measurement can be used to monitor temperature or bead width. In other cases, however, the camera was placed off-axis [17–21]. By means of this arrangement both the height of the bead and the accumulated height of the part [22–26] can be measured. The off-axis configuration, on the other hand, may produce measurement differences depending on the direction followed by the deposition and is usually applied to simple geometries such as single-track walls. In order to minimise direction-independence, three CCD cameras were installed by Irvani-Tabrizi-pour et al. [27] at different angles around the laser head. Heralić et al. [28] projected a low-power laser line on the previous track and a camera placed in front calculated the height based on the projection.

A camera provides in-situ height measurements and corrections during deposition. Conversely, calibrating the camera adds complexity to the system as it may vary according to different deposition parameters or materials. A solution used to avoid image processing introduces direct height measurements based on laser triangulation. Tang et al. [29] installed a laser displacement sensor on the deposition head to measure the height profile of a single track wall during the process and calculated the powder flow rate for the following layer. A line scanner was installed by Heralić et al. [30] for the purpose of eliminating direction dependence and obtaining the height profile of the previous layer. Due to harsh operating conditions, the process had to be stopped for scanning, although this resulted in a precise, direction-independent measurement.

Control must be implemented once the height measurement system has been defined. Cameras can be used in closed-loop systems, in which deposition velocity [23] or laser power [24,26] are adjusted based on the error found between the expected height and the measurement proper. Due to a slow response of build height to feed rate variations for both wire and powder, this parameter is unsuitable for in-situ feedback control. Arrizubieta et al. [31] addressed this issue by installing a solenoid-based powder flow control system to immediately regulate the flow of powder into the pool.

As regards measuring systems based on laser triangulation, however, feedback control cannot be performed until this moment due to the difficulties encountered in measuring on-line. Instead, several authors [28–30] calculated the powder or wire feed rate of subsequent layers after measuring the height profile.

All height controls described herein attempt to adjust process input parameters to obtain a beam that matches a desired height value. The growth of the different layers in a part, however, can vary considerably throughout the process and limit control effectiveness. In [32] a height compensation was introduced based on height measurements to maintain the gap between the nozzle and the part. This gave rise to smaller deviations in the manufactured part's geometry relative to the Computer Aided Design (CAD). It explains why a complementary procedure is also necessary to modify deposition trajectories as a function of height measurements. Moreover, and although there are some publications addressing the coaxial deposition of metallic wire [33–35], in this particular case, the effect caused by height deviations was not clear. Consequently, it is necessary to have a better understanding of

wire LMD and to extensively develop adapted control algorithms.

This paper complements the work presented in [32]. The process is stopped once a predefined number of layers is reached and measured with a 3D scanner using structured light projection. A novel adaptive Computer Aided Manufacturing (CAM) procedure is presented that calculates deposition trajectories of subsequent layers according to the height measured. By using the strategy of measuring and redefining the trajectories according to the height of the part, the stability of the process is ensured, avoiding failures and reducing geometric deviations from the theoretical CAD model. Method effectiveness has been demonstrated in the LMD process in the case of powder and wire inputs.

2. Experimental set-up

2.1. LMD set-up

Due to the portability of the monitoring system, it has been possible to implement it in two AM robotic cells, whose characteristics are summarized in Table 1.

In the first cell (Fig. 1a) a 2.2 kW diode pumped continuous wave Rofin DY022 Nd:YAG laser was used to deposit Metco 42C martensitic stainless steel powder on a 15 mm thick C45E carbon steel substrate. The laser beam was guided towards the working area by a 600 µm diameter circular fibre and a Precitec optical head. Laser head motion was provided by a 6-axis ABB 4400-60 robot.

The second cell (Fig. 1b) consisted of an IPG YLS 4000 S2T 4 kW laser and a COAXwire cladding head developed by Fraunhofer IWS. A DINSE wire feeder provided a 0.8 mm diameter 316LSi stainless steel wire that was deposited on a 15 mm thick C45E carbon steel substrate. A 6-axis ABB IRB4600-45 robot provided relative motion.

2.2. Monitoring and control system

The measuring system chosen was a HP SLS3 structured light-based 3D scanner (Fig. 1c). This scanner allows to adjust the distance between the projector and the camera as well as the angle between them, allowing to measure objects of different sizes. This scanner is a flexible solution since it can be translated between different manufacturing environments. The distance and angle between the projector and the camera can be adjusted as well as the angle to the part, allowing to measure parts of different sizes. According to the manufacturer's specifications this system can reach 0.05 mm in precision in the scanned volume. The accuracy of the scanner and its repeatability have been verified through the measurement of a physical standard. The scanner was placed in a fixed position, with a field of view that allowed the top layer to be scanned throughout the process. Point cloud processing and the control strategy were executed by an application developed with Matlab.

3. Methodology

3.1. Scanning and height determination

The process is stopped after a group of layers has been deposited and then the upper layer is scanned. As shown in Fig. 2, the coordinates corresponding to each scanning point are initially defined in a Scanning Coordinate System, SCS. This coordinate system depends on the position and orientation of the scanner. In order to determine the height of

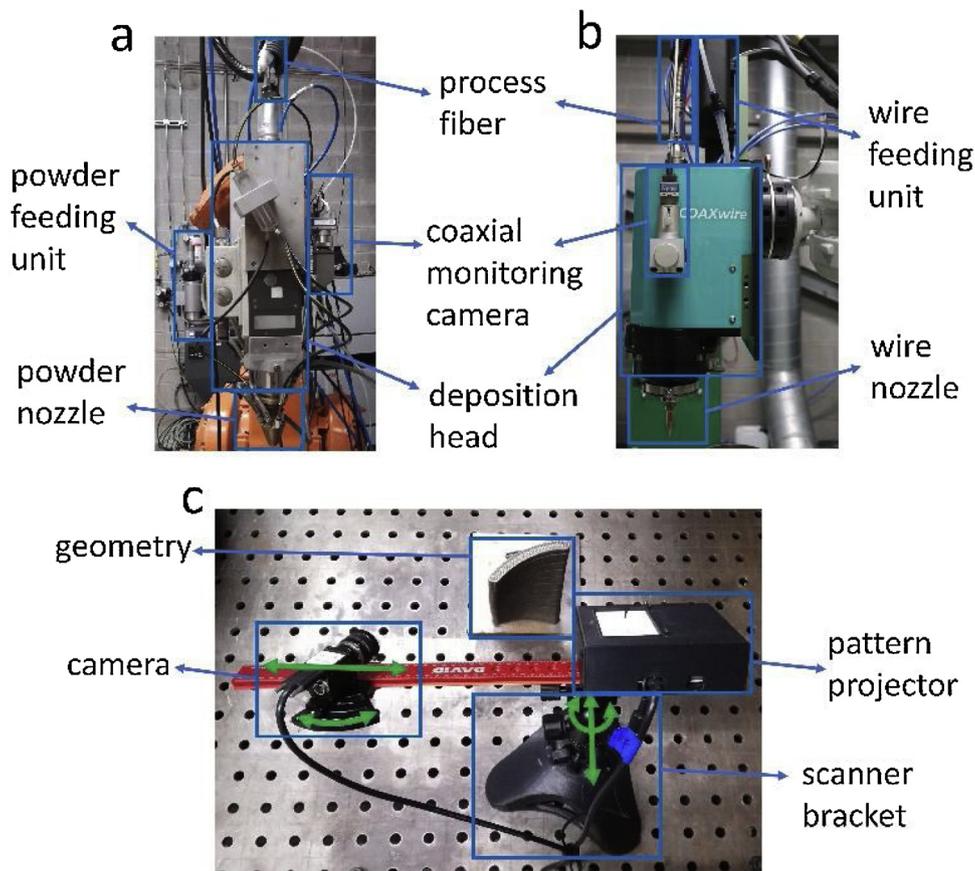


Fig. 1. LMD facilities at IK4-Tekniker. (a) Powder LMD; (b) Wire LMD; (c) Structured light scanner.

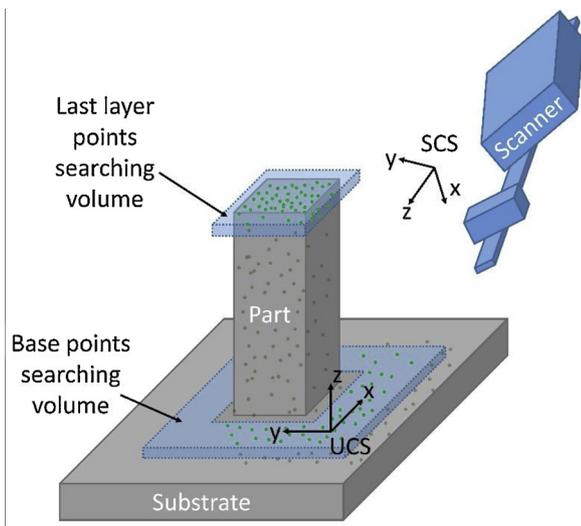


Fig. 2. Scanning arrangement and Scanning and User Coordinate Systems.

a part, the coordinates of the points based on a new coordinate system called User Coordinate System (UCS) must be expressed. In this coordinate system, two of the components, x and y , form a plane that contains the base of the part, whereas the third component, z , is normal relative to this plane and corresponds to the direction in which the part grows. In order to identify base points only, a volume is established in which the points of the base are searched in every scan (see Fig. 2) once settings have been completed with regard to the position and orientation of the scanning equipment at the beginning of a deposition. Since the real height of the part should be similar to its theoretical growth,

the determination of the height of the last deposited layer can also be limited to those points whose z component lies within a range close to the expected height. This searching volume is updated for every group of layers scan.

To obtain the base of the UCS, a plane is fitted to the point cloud of the base by means of Principal Component Analysis (PCA). The ultimate goal is to obtain the eigenvalues and eigenvectors of the covariance matrix C (Eq. 1).

$$C \cdot V = V \cdot D \quad (1)$$

where:

C is the 3×3 covariance matrix:

$$C = \begin{bmatrix} [b_{i1} - \bar{b}]_{SCS} \\ \dots \\ [b_{ik} - \bar{b}]_{SCS} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} [b_{i1} - \bar{b}]_{SCS} \\ \dots \\ [b_{ik} - \bar{b}]_{SCS} \end{bmatrix}, i_j \in N_p$$

V is a 3×3 matrix where the columns are the eigenvectors.

D is a 3×3 diagonal matrix with the eigenvalues in the main diagonal.

$[b_i]_{SCS}$ are all the points acquired in the base scan, as defined in the SCS.

$[\bar{b}]_{SCS}$ is the mean value of the base points, as defined in the SCS.

N_p is the number of points in the base point searching volume.

The UCS base is composed of the three eigenvectors obtained in V . The eigenvector corresponding to the smallest eigenvalue represents the normal to the fitted plane, to be used as the z component in the UCS or as the part's growth direction.

Every point cloud acquired from a scan will undergo a change of the coordinate system that can be defined as a translation and rotation of the points acquired (Eq. 2). Firstly, translation ensures that the origin of the UCS is placed on the average of the points acquired when the base is scanned and, therefore, on the plane where the deposition starts.

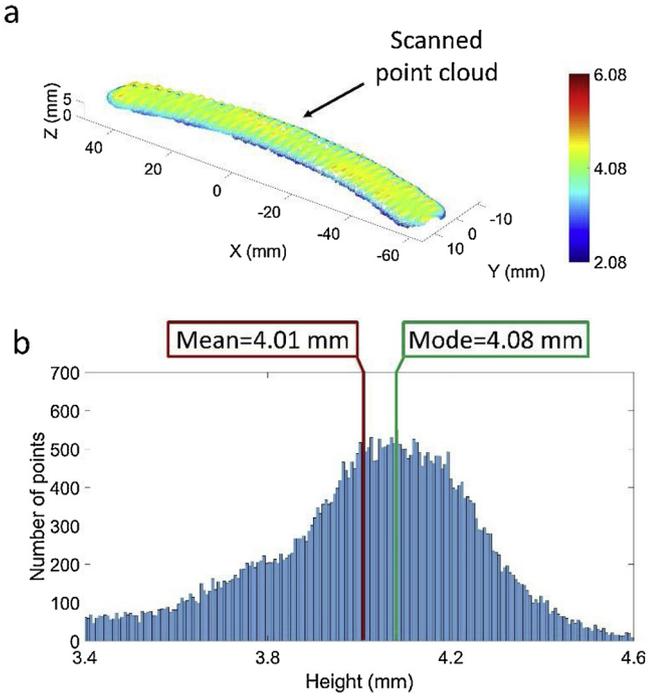


Fig. 3. Build height determination. (a) Height profile of the layer and deviations relative to the expected height; (b) Histogram of point cloud heights with mean and mode value calculation.

Rotation, moreover, also referred to as basis change, defines the z-axis as the direction for part growth, and places the x and y axes on the base plane.

$$[p_i]_{UCS} = V^T \cdot [p_i - \bar{b}]_{SCS} \quad (2)$$

where:

- $[p_i]_{UCS}$ are all the points acquired in a scan, as defined in the UCS.
- $[p_i - \bar{b}]_{SCS}$ is the translation of the scan points in the SCS.
- V^T is the rotation or change of the basis matrix.

$[p_i]_{SCS}$ are all the points acquired in a scan, as defined in the SCS. The height of the layer can be then determined by the mean value or the z component mode of points inside the last layer height searching volume (Fig. 2). Fig. 3a shows the point cloud of the last layer with the deviation in height from the theoretical growth. In Fig. 3b the histogram of the point cloud heights and the average and mode values obtained can be observed.

In this procedure, a coordinate system has been calculated based on the points of the base for each scan. Compared to using the same coordinate system for all scans, it has improved scanning accuracy as a result of differences between scans caused by minor movements involving certain parts of the measuring equipment or thermal effects. In future work, an approach will be developed to obtain a Global Coordinate System (GCS) common to all scans. In addition to measuring height, it will also allow part deviations to be measured in all directions

to compare readings with the CAD model.

3.2. Control strategy

The control strategy consists in generating deposition paths that completely fill a CAD model based on a user-defined deposition pattern, as well as events controlling the on/off mode of the laser and material feeds in the form of powder or wire. Most trajectory generation packages calculate deposition paths based on a CAD model, prior to deposition, and do not change them during the process. This may represent a problem should any parameters not be defined properly initially and give rise to a process failure. When large parts are involved, the height of the layer initially failed in the path generation step is a fundamental parameter. Errors can be propagated in the direction of part growth as more and more layers are gradually deposited. In addition, growth may be non-homogeneous as a function of the part's geometry or the thermal status of previously deposited material. Consequently, this paper develops an alternative procedure to recalculate deposition trajectories based on the growth of previously deposited layers. Fig. 4 shows a diagram of the control strategy.

If, at some point during the deposition process, in an i -th group of layers, the process is halted and the last deposited layer is scanned, regardless of whether the value of layer height was fine-tuned in previous tests, an error, e_i , will be inevitable between the theoretical, $z_{t,i}$, and the real height of the piece, $z_{r,i}$:

$$e_i = z_{r,i} - z_{t,i} \quad (3)$$

This error may increase over time, resulting in a non optimal distance between the nozzle and the substrate.

The theoretical height of the part, i.e. the expected height to be reached after depositing the i -th group of layers, is calculated as:

$$z_{t,i} = z_{r,i-1} + h_{t,i} \cdot n_i \quad (4)$$

where:

- $z_{r,i-1}$ is the real part height before depositing the i -th group of layers
- $h_{t,i}$ is the theoretical layer height for the i -th group of layers
- n_i is the number of layers to be deposited in the i -th group.

If the final height of the part has not been reached, the paths for the next layer group are then calculated based on a scan. Firstly, though, layer height is updated as follows:

$$h_{t,i+1} = \frac{z_{r,i} - z_{r,i-1}}{n_i} \quad (5)$$

The deposition volume of the next group of layers consists in slicing the CAD model from the measured height, $z_{r,i}$, to the new expected height $z_{t,i+1}$, which is again calculated using Eq. 2 (Fig. 5). In this case, the CAD format used is STL that forms part geometry based on triangular surfaces called facets.

The part's STL (Fig. 6a) is sliced between the two specified heights according to the algorithms presented in [36,37]. The STL slice (Fig. 6b) can now be fed into trajectory generator software to obtain the trajectories of the next group of layers. There are currently several programmes that generate AM deposition paths or laser scanning strategies based on a STL model, although only a few are specific to the

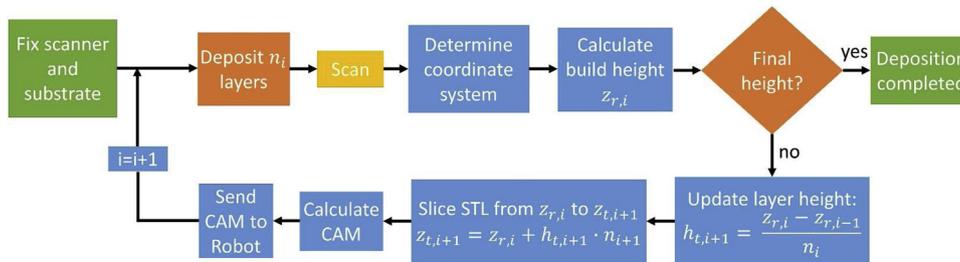


Fig. 4. Control strategy diagram.

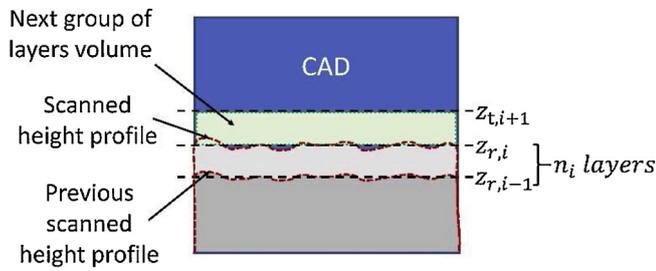


Fig. 5. Scan-based adaptive slicing of the CAD model.

LMD process. They are mostly geared towards Powder Bed Fusion processes or Additive Manufacturing of polymeric components, meaning that parameters to be used in DED processes must be adjusted, as done by Nilsiam et al. in [38]. A similar procedure is implemented here, where the open source slic3r software has been adapted to LMD using powder and wire. This choice of this software was motivated by the fact that some of its zig-zag or spiral filling patterns can be used in the LMD process; it can also adjust deposition parameters directly by using the command line interface. This feature allows these parameters to be adjusted and generates trajectories automatically. It is also used to recalculate the deposition path based on height measurement readings. In the final stage, output trajectories are generated in GCODE format and transformed into the robot's language. A zig-zag filling strategy is implemented in this paper in which successive layers are rotated 90°. An outer perimeter is also introduced into each layer (Fig. 6c).

Process stability is guaranteed and propagation of the error along the height of the part is avoided whenever the control strategy is used. This also reduces initial parameter testing before the definitive deposition takes place because layer height, one of the key parameters, is adjusted during deposition. Files containing deposition paths written in the robot's language are finally sent to the robot via an FTP protocol to deposit the next group of layers. The robot controller then loads the program module with CAM trajectories when the main program starts running.

4. Results and discussion

4.1. Laser metal deposition of test parts

This development is a continuation of previous work [32] in which a control strategy was established to generate pyramids similar to the one shown in Fig. 7a. In this instance, hexahedrons were deposited using metallic powder and wire as raw materials, Fig. 7b, and c. Eventually, the demonstrator shown in Fig. 7d was generated to demonstrate the effectiveness of the control strategy. All geometries were

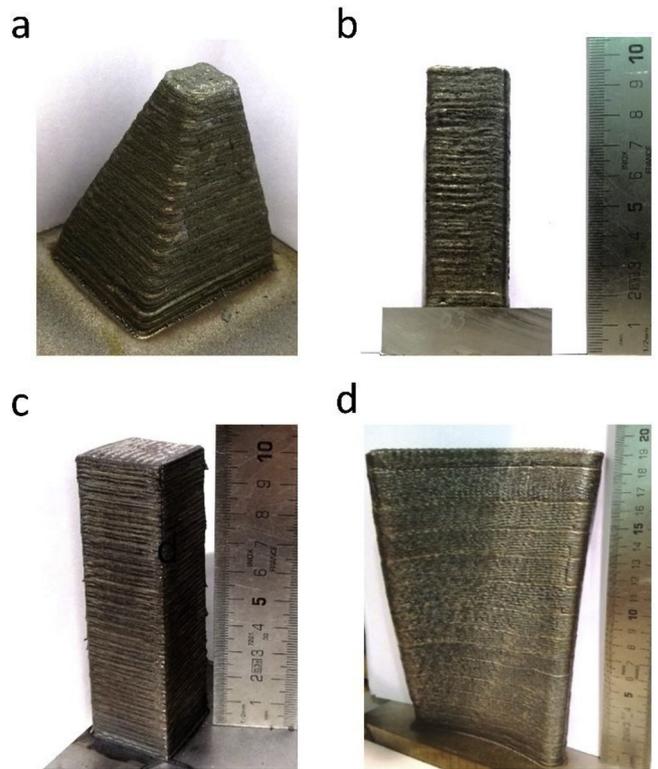


Fig. 7. Test parts. a) Pyramid made from powder and the control strategy presented in [32]; (b) Hexahedron made from powder; (c) Hexahedron made from wire; (d) Demonstrator of the control strategy made from powder.

made with a zigzag infill pattern and an external perimeter on each layer. The number of layers deposited between each scan was manually defined in each particular case. However, in future developments it could be automatically modified as a function of the absolute value of the height deviation.

4.2. Layer height influence and stability in powder LMD

Hexahedrons measuring 25 × 25 × 80 mm (Fig. 7b) were manufactured to demonstrate how influential height deviations were with regard to part growth and efficiency with different theoretical layer heights, h_t . The height control strategy was used to build one of the hexahedrons. Each part was scanned every certain number of layers and produced a height error, e_t . Fig. 8a shows the mean value of layer height in the group of layers that had been deposited previously and Fig. 8b

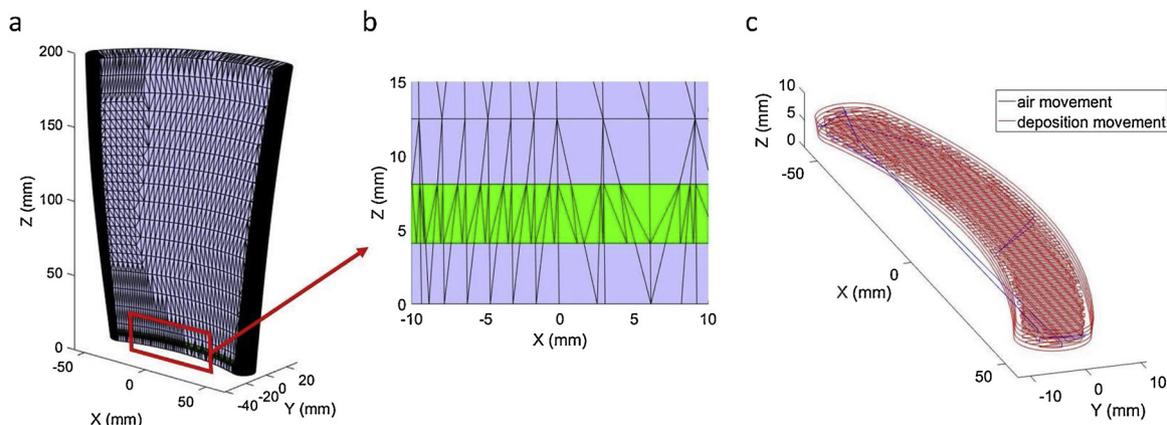


Fig. 6. Trajectory generation based on the STL model. (a) STL model of the part; (b) Slice of the STL to be deposited (green); (c) Calculated trajectory based on the sliced STL (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

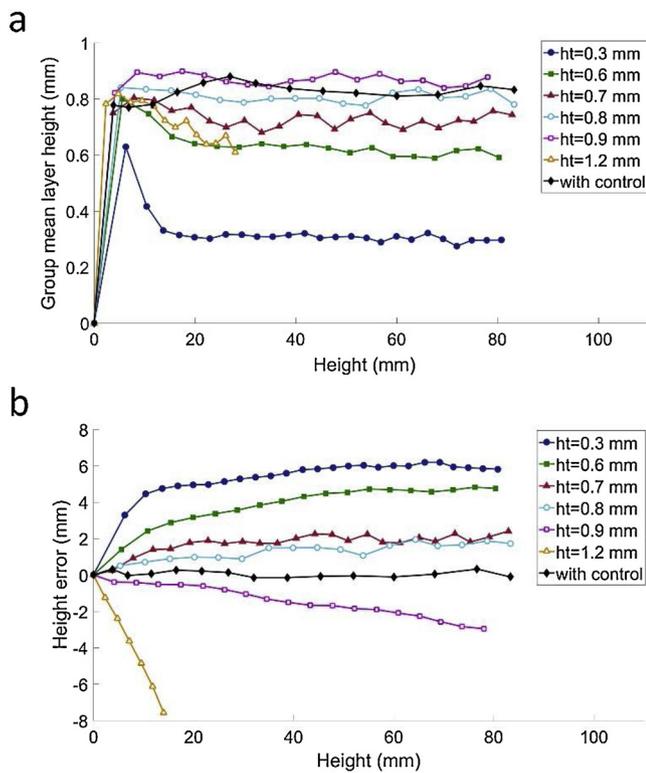


Fig. 8. Mean layer height of each group of layers and evolution of the height error as a function of the reached height. (a) Layer height; (b) Height error.

shows how the error progressed in each case.

It can be observed that in those cases in which theoretical layer height was lower than real layer growth, $h_t = 0.3, 0.6$ and 0.7 mm, the part grew more than was expected, so height error took on positive values. In addition, the height error grew faster when layer heights were lower. The error and the average layer height per group were stabilized once a few layers had been deposited. The average layer height acquired then a value similar to theoretical layer height, thus growing only the height that the robot's movement allows, and reaching the self-compensation situation described by Zhu et al. [6].

When the theoretical layer height was higher than the real growth of the layer, $h_t = 0.9$ and 1.2 mm, the error turned negative. However, height error increased and was not compensated, not leading to a stable value and even reaching the deposition failure for $h_t = 1.2$ mm. It can also be seen how the real layer height of the part decreased when an excessive height error was noted.

Finally, when the control strategy was applied, maximum height error was kept under 0.3 mm. It can also be seen how part grew less in the lower layers. This is due to lower part temperatures and higher heat dissipation close to the base when deposition starts. The control strategy can correct this phenomenon by adjusting the theoretical layer height of the next group of layers. It can also be applied to parts where the section varies along the height and where heat dissipation can also affect the growth of a part.

Fig. 9 shows the deposition rate and powder capture efficiency for each theoretical layer height test and also the controlled case. In the controlled case, it shows how near-maximum efficiency and a deposition rate can be obtained for these parameters, whilst process stability is guaranteed.

4.3. Layer height influence and stability in wire LMD

Height control becomes even more relevant in the case of wire LMD. As explained in Section 4.2, a height deviation when powder is used can ensure process stability at the expense of reducing powder trapping

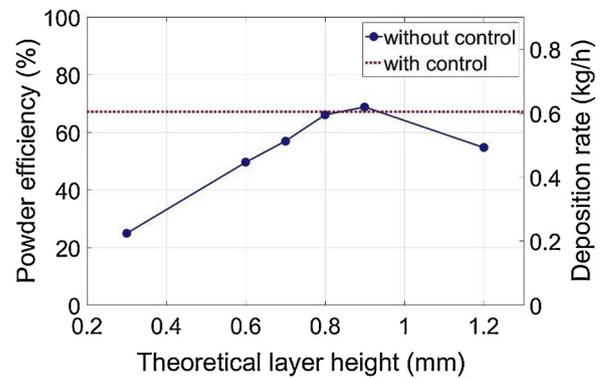


Fig. 9. Deposition rate and powder catchment efficiency as a function of the theoretical layer height, compared to the controlled case.

efficiency. When wire is used, 100% feeding efficiency is achieved because all the material inserted is melted. Compared to powder, this represents a major competitive advantage, although it makes it more difficult to ensure process stability.

The laser beam characterised by a PRIMES FocusMonitor is shown in Fig. 10. The optical system of the deposition head consists of beam-splitting optics dividing the collimated laser beam into three separate beams, which are subsequently focused onto a circular focal point (Fig. 10a). A direction-independent deposition is achieved by inserting the wire in the centre of the three beams once they have been focused. On the other hand, and as the working plane moves away from the focus (Fig. 10b, c and d), the area where the three beams converge is smaller making the process more sensitive to a potential off-centering of the wire. This is why height control plays a critical role in maintaining the focus on the working distance.

The height control strategy with wire input was tested by manufacturing $30 \times 30 \times 100$ mm hexahedrons using, yet again, the zigzag and contour strategy. Since a wire diameter of 0.8 mm and a feed rate of 3.5 m/min were used, the end result was a 0.83 kg/h feed rate. Based on

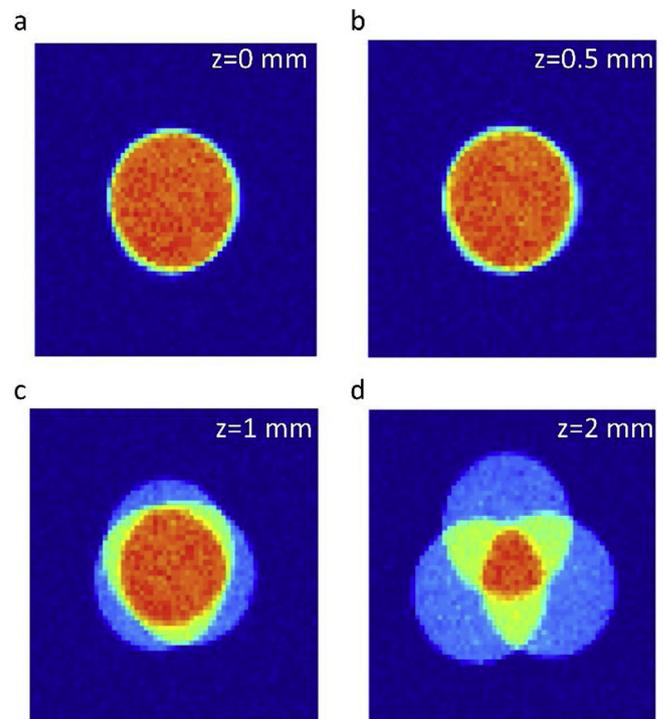


Fig. 10. Laser beam characterisation. (a) In focus; (b) 0.5 mm away from focus; (c) 1 mm away from focus; (d) 2 mm away from focus.

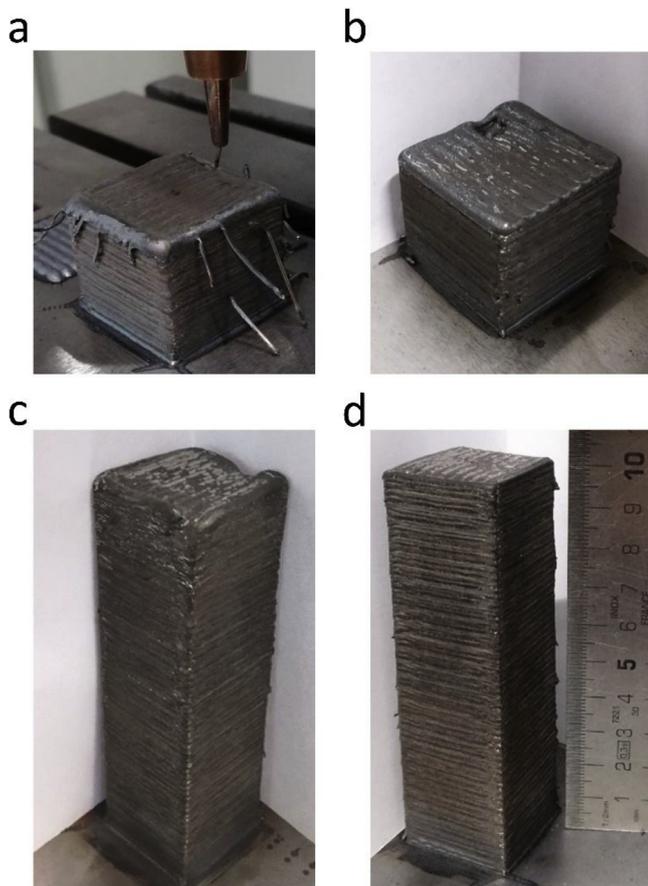


Fig. 11. Hexahedrons built with wire LMD and different theoretical layer heights. (a) 0.85 mm layer height without control; (b) 0.93 mm layer height without control; (c) 0.9 mm layer height without control; (d) with control.

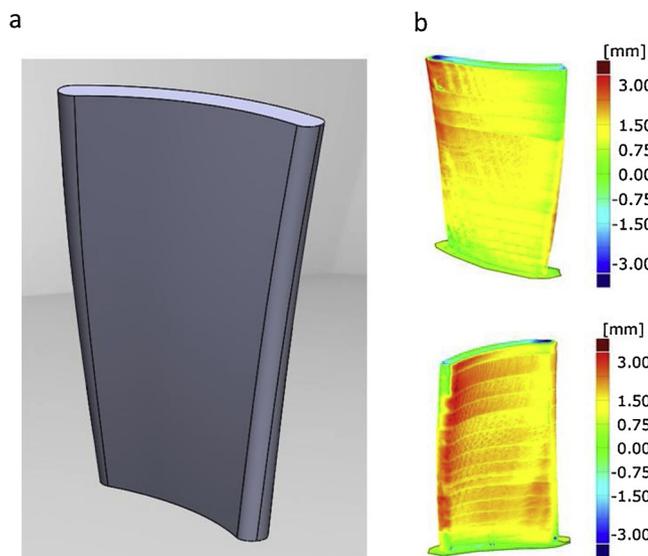


Fig. 12. Control strategy demonstrator. (a) CAD model; (b) Deviations of the finished geometry relative to CAD.

previous experiments, real growth of a layer was found to be approximately 0.9 mm, so hexahedrons were manufactured again with lower, 0.85 mm (Fig. 11a), and higher, 0.93 mm (Fig. 11b) theoretical layer heights. Hexahedrons with a theoretical layer height of 0.9 mm (Fig. 11c) was also manufactured and a case to which the control strategy was applied (Fig. 11d).

With the exception of the case in which geometrical control was applied (Fig. 11d), the process became unstable after depositing several layers. When the distance between the nozzle and the part increased, the wire melted before it reached the surface and produced a non-bonding of the material to the part (Fig. 11b and c). On the other hand, when the distance between the head and the piece decreased, wire adherences could be found on part if not properly melted (Fig. 11a).

4.4. Demonstrator

The demonstrator shown in Fig. 12a was constructed with LMD and powder to test the effectiveness of height control on medium to large sized parts. Fig. 12b shows geometric deviations relative to CAD. Although the part was successfully constructed, it can be noted that deviations relative to CAD increased as the part grew. This may be due to the fact that heat dissipation may become more difficult as the part grows, increasing the temperature of the part and therefore also the amount of powder that is fused. However, this work has been subjected to a purely geometric control so the thermal aspects affecting the deposition will be dealt with in future work. In addition, the part did not reach the desired height in certain locations. Work in the future, therefore, will focus on achieving local height control within each layer and on measuring distortions in all directions throughout the part. Another major aspect to consider is how thermal effects produce different growth of the part during deposition, which means that deposition parameters will have to be adapted to a range of temperature readings.

5. Conclusion

A closed loop control system has been developed which allows to control the height of the part by means of a structured light scanner. The deposition trajectories are calculated during the process according to the obtained height profile. The correction strategy has been implemented and validated for powder and wire based stainless steel laser metal deposition. The implementation of the measuring system in other materials such as titanium, nickel or aluminium alloys will be tested in the future.

In the case of powder LMD, the use of a control loop system increased material efficiency as it was used optimally during the process and allowed near-net-shape geometries to be deposited with greater accuracy.

With regard to wire LMD, the closed-loop system makes the process more stable as long as minor deviations between the laser focusing point and the last layer height, the so-called z dimension, are properly monitored. It has been concluded that it is critical to avoid these deviations when the aim is to achieve uniform and massive depositions provided that, contrary to what happens with powder, wire technology does not perform self-compensation.

Funding

This work was supported by the Basque Government through the Addisend project which is part of the Elkartek 2018 programme.

References

- [1] Thomas D, Gilbert S. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing vol. 1176. NIST Spec. Publ.; 2014. p. 1–77. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>.
- [2] Allen J. An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs. machine from solid for aero engine parts. Cost Eff. Manuf. via Net Shape Process 2006. <https://doi.org/10.14339/RTO-MP-AVT-139-17>. p. 17-1-17-10.
- [3] Tuominen J, Näkki J, Pajukoski H, Peltola T, Vuoristo P, Kuznetsov M, et al. Laser cladding with 15 kW fiber laser. Proc. 13th NOLAMP Conf. Trondheim 2011. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3552.2406>.
- [4] Turichin GA, Somonov VV, Klimova OG. Investigation and modeling of the process of formation of the pad weld and its microstructure during laser cladding by radiation of high power fiber laser. Appl Mech Mater 2014;682:160–5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00000-0_160.

- [org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.160](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.160).
- [5] Zhong C, Gasser A, Kittel J, Schopphoven T, Pirch N, Fu J, et al. Study of process window development for high deposition-rate laser material deposition by using mixed processing parameters. *J Laser Appl* 2015;27:32008. <https://doi.org/10.2351/1.4919804>.
 - [6] Zhu G, Li D, Zhang A, Pi G, Tang Y. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition. *Opt Laser Technol* 2012;44:349–56. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.07.013>.
 - [7] Mani M, Lane BM, Donmez MA, Feng SC, Moylan SP. Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes. 2016. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1223378>.
 - [8] Everton SK, Hirsch M, Stravroulakis P, Leach RK, Clare AT. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Mater Des* 2016;95:431–45. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099>.
 - [9] Purtonen T, Kalliosaari A, Salminen A. Monitoring and adaptive control of laser processes. *Phys Procedia* 2014;56:1218–31. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.038>.
 - [10] Bi G, Gasser A, Wissenbach K, Drenker A, Poprawe R. Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding. *Opt Lasers Eng* 2006;44:1348–59. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.01.009>.
 - [11] Bi G, Schürmann B, Gasser A, Wissenbach K, Poprawe R. Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors. *Int J Mach Tools Manuf* 2007;47:555–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.05.010>.
 - [12] Hofman JT, Pathiraj B, Van Dijk J, De Lange DF, Meijer J. A camera based feedback control strategy for the laser cladding process. *J Mater Process Technol* 2012;212:2455–62. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.027>.
 - [13] Hu D, Kovacevic R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. *Int J Mach Tools Manuf* 2003;43:51–60. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00163-3).
 - [14] Ocylok S, Alexeev E, Mann S, Weisheit A, Wissenbach K, Kelbassa I. Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring. *Phys Procedia* 2014;56:228–38. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.167>.
 - [15] Colodrón P, Fariña J, Rodríguez-Andina JJ, Vidal F, Mato JL, Montealegre MÁ. FPGA-based measurement of melt pool size in laser cladding systems. *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.* 2011:1503–8. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984383>.
 - [16] Hu D, Mei H, Tao G, Kovacevic R. Closed loop control of 3d laser cladding based on infrared sensing. *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.* 2001. p. 129–37.
 - [17] Bardin F, McBride R, Moore A, Morgan S, Williams S, Jones JDC, et al. Real time temperature measurement for process monitoring of laser conduction welding. *Proc. Int. Congr. Appl. Lasers Electro-Optics.* 2004. p. 1–24.
 - [18] Doubenskaia M, Pavlov M, Grigoriev S, Smurov I. Definition of brightness temperature and restoration of true temperature in laser cladding using infrared camera. *Surf Coatings Technol* 2013;220:244–7. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.044>.
 - [19] Smurov I, Doubenskaia M, Zaitsev A. Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation. *Surf Coatings Technol* 2013;220:112–21. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.053>.
 - [20] Pavlov M, Novichenko D, Doubenskaia M. Optical diagnostics of deposition of metal matrix composites by laser cladding. *Phys Procedia* 2011;12:674–82. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.084>.
 - [21] Smurov I, Doubenskaia M, Grigoriev S, Nazarov A. Optical monitoring in laser cladding of Ti6Al4V. *J Therm Spray Technol* 2012;21:1357–62. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9808-4>.
 - [22] Seltzer D, Schiano JL, Nassar AR, Reutzel EW. Illumination and image processing for real-time control of directed energy deposition additive manufacturing. *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.* 2016. p. 1479–86.
 - [23] Fathi A, Khajepour A, Toyserkani E, Durali M. Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller. *Int J Adv Manuf Technol* 2006;35:280–92. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0721-1>.
 - [24] Toyserkani E, Khajepour A. A mechatronics approach to laser powder deposition process. *Mechatronics* 2006;16:631–41. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2006.05.002>.
 - [25] Meriaudeau F, Truchetet F, Grevey D, Vannes AB. Laser cladding process and image processing. *J Laser Eng* 1997;6:161–87.
 - [26] Song L, Bagavath-Singh V, Dutta B, Mazumder J. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process. *Int J Adv Manuf Technol* 2012;58:247–56. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3395-2>.
 - [27] Irvani-Tabrizipour M, Toyserkani E. An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height. *Mach Vis Appl* 2007;18:343–54. <https://doi.org/10.1007/s00138-006-0066-7>.
 - [28] Heralić A, Christiansson AK, Ottosson M, Lennartson B. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. *Opt Lasers Eng* 2010;48:478–85. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.012>.
 - [29] Tang L. Layer-to-Layer height control for laser metal deposition process. *J Manuf Sci Eng* 2011;133:473–94. <https://doi.org/10.1115/1.4003691>.
 - [30] Heralić A, Christiansson A-K, Lennartson B. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. *Opt Lasers Eng* 2012;50:1230–41. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.03.016>.
 - [31] Arrizubieta JI, Martínez S, Lamikiz A, Ukar E, Arntz K, Klocke F. Instantaneous powder flux regulation system for laser metal deposition. *J Manuf Process* 2017;29:242–51. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.018>.
 - [32] Garmendia I, Leunda J, Pujana J, Lamikiz A. In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning. *Procedia Cirp* 2018;68:375–80. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.098>.
 - [33] Nowotny S, Brueckner F, Thieme S, Leyens C, Beyer E. High-performance laser cladding with combined energy sources. *J Laser Appl* 2015;27:S17001. <https://doi.org/10.2351/1.4817455>.
 - [34] Pajukoski H, Näkki J, Thieme S, Tuominen J, Nowotny S, Vuoristo P. High performance corrosion resistant coatings by novel coaxial cold- and hot-wire laser cladding methods High performance corrosion resistant coatings by novel coaxial cold- and hot-wire laser cladding methods. *J Laser Appl* 2016;28:12011. <https://doi.org/10.2351/1.4936988>.
 - [35] Nowotny S, Thieme S, Albert D, Kubisch F, Kager R, Leyens C. Generative manufacturing and repair of metal parts through direct laser deposition using wire material. *IFIP Adv Inf Commun Technol* 2013;411:185–9. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41329-2_20.
 - [36] Brown AC, de Beer D. Development of a stereolithography (STL) slicing and G-code generation algorithm for an entry level 3-D printer. *IEEE Africon*; 2013. <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2013.6757836>.
 - [37] Topçu O, Taşcıoğlu Y, Ünver HÖ. A method for slicing CAD models in binary STL. *Int. Adv. Technol. Symp.* 2011. p. 141–5.
 - [38] Nilsiam Y, Sanders P, Pearce JM. Slicer and process improvements for open-source GMAW-based metal 3-D printing. *Addit Manuf* 2017;18:110–20. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.007>.

Anexo 2: Development of an Intra-Layer Adaptive Toolpath Generation Control Procedure in the Laser Metal Wire Deposition Process

Artículo en *Materials* 2019, 12(3), 352.

Autores: I. Garmendia, J. Pujana, A. Lamikiz, J. Flores, M. Madarieta.

DOI: [10.3390/ma12030352](https://doi.org/10.3390/ma12030352).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Article

Development of an Intra-Layer Adaptive Toolpath Generation Control Procedure in the Laser Metal Wire Deposition Process

Iker Garmendia ^{1,*} , Joseba Pujana ¹, Aitzol Lamikiz ² , Jon Flores ¹ and Mikel Madarieta ¹

¹ TEKNIKER, Calle Iñaki Goenaga, 5 20600 Eibar, Spain; joseba.pujana@tekniker.es (J.P.); jon.flores@tekniker.es (J.F.); mikel.madarieta@tekniker.es (M.M.)

² Department of Mechanical Engineering, University of the Basque Country, Plaza Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain; aitzol.lamikiz@ehu.eus

* Correspondence: iker.garmendia@tekniker.es; Tel.: +34-943-206-744-9622

Received: 21 December 2018; Accepted: 21 January 2019; Published: 23 January 2019



Abstract: Recently developed concentric laser metal wire deposition (LMWD) heads allow metal addition processes which are independent of the deposition direction, thus enabling complex paths to be generated. The sensitivity of the process to height deviations has experimentally been observed to be greater with this type of head than with powder ones, therefore requiring more precise and local process control algorithms to be implemented. This work developed a methodology for measuring the part, layer by layer, using a 3D scanner based on structured laser light. Height corrections were applied to the mean and intra-layer height deviations by recalculating the deposition trajectories of the next layer to be deposited. Local height deviations were adjusted by varying the scanning speed, thus increasing the feed rate in the lower areas and decreasing it in the higher ones. Defects generated in the purpose, with height differences within the layer, were successfully corrected. A flat layer was re-established through the application of the control strategy. The internal integrity of the parts due to the scanning speed variation was analyzed, resulting in fully dense parts. The structured light measurement and height correction systems are found to be an affordable and time-efficient solution that can be integrated into an LMWD environment, thereby improving the process robustness.

Keywords: laser deposition; metal wire; height control; monitoring; cladding; additive manufacturing; coaxial wire feed; structured light scanning

1. Introduction

Laser metal deposition (LMD) is an additive manufacturing (AM) technique in which a high-power laser melts a filler material in the form of powder or wire, resulting in layer-by-layer manufacturing along a predefined robot or machine path [1].

AM allows near net-shape components to be produced for specific sectors in a process which is costly. In contrast to subtractive techniques, the amount of raw material required for manufacturing is close to the volume of the final part, requiring only subsequent finish machining to reach the final shape. This characteristic arouses the interest of sectors such as aeronautics or aerospace, in which expensive materials such as titanium and nickel-base alloys are often used. These geometries require either heavy machining operations with high amounts of wasted material [2,3] or costly forging operations prior to machining. The addition of material in wire form means that 100% of the material introduced is melted, resulting in a more efficient, safe, and clean process than in the case of powder LMD. As wire is cheaper than powder, the laser metal wire deposition (LMWD) process is also more cost-efficient [4].

However, there are process robustness barriers that need to be overcome before AM systems are suitable for use in industrial environments. Due to the large number of variables that are handled in the process, it is often difficult to detect the cause of a process failure that may compromise the internal quality of a part and even more so if the failure is the result of a combination of causes. Therefore, new developments in the field of process monitoring and control are still necessary before it is appropriate to incorporate AM technologies into industrial settings [5].

Reviews of different LMD monitoring and control methods have been presented [6,7]. Some authors attempt to maintain process stability by employing vision cameras [8–13]. By placing a coaxial camera on the deposition head, it is possible to obtain a measurement independent of the deposition direction. In this way, it is possible to monitor the size of the molten pool and control it by varying input parameters such as power or scanning speed. The correct choices for the measurement wavelength range of the camera and filters arranged in the optical path are critical aspects to obtain a suitable measurement.

LMWD introduces some differences with respect to powder LMD that require a better understanding of the process and new developments regarding in-process control. Some laser welding and repairing heads insert the wire laterally at a defined angle to the processing laser, although this same configuration has also been used to grow parts of simple geometry layer by layer [14]. However, generating geometries with direction changes requires independence in the deposition direction. Wu et al. [15] presented an approach for achieving deposition direction independence in which the welding torch rotated according to the deposition direction in a process of wire arc additive manufacturing (WAAM). Some recently developed LMWD heads [16–20] solve the direction dependence issue by inserting the wire perpendicular to the substrate, so the laser beam is divided within the head and then refocused on the working plane. This introduces the additional complexity of accurately reconstructing the laser beam. Due to the angle of the divided beams with respect to the vertical, the shape of the laser spot changes significantly when varying the working distance. Furthermore, while the defocusing effect is important in powder deposition [21], it is critical in the case of LMWD. Motta and Demir [17] described the issues concerning height deviation using a high-speed vision camera. Defects were observed such as stubbing when the working distance was too small and dripping when it was too large. For this reason, control of the distance between head and part is essential to maintain constant laser power distribution in the working plane and avoid process failures.

By placing a camera off-axis, it is possible to obtain geometric information such as the height of the bead, or the relative position of the robot with respect to the part [22–24]. In this way, online corrections of the deposition parameters or the position of the head can be made. However, the cases in which this type of control have been applied are simple geometries, such as single-track walls, and the measurement can give rise to great differences in the case of solid parts with overlapping filling patterns. Donadello et al. [25] developed a novel system of coaxial camera and laser projection which estimated the height of the piece by triangulation. This allowed a measurement of the height during deposition, although the accuracy for more complex geometries was not verified.

In other cases, metrological systems based on triangulation have been investigated. Buhr et al. [26] studied the influence of thermal radiation on the accuracy of the measurements in a line scanner placed on the head and reached the conclusion that, due to the high light emissions of the process, current measurement systems cannot perform accurate measurements during continuous deposition. Interruption of the process makes the precision of the scanner measurement higher than in the case of vision cameras and it is applicable to any geometry. Heralić et al. [27] also introduced a laser line scanner to obtain the height profile of the deposited piece and calculated the wire input for the next layer.

In this work, a structured light-based scanning technology was employed. A sequence of laser light patterns was projected onto the part and a camera calculated the distance to each point by triangulation. The advantage over a laser line scanning system is that the measurement can be made from an external fixed position without the need to introduce an extra movement, which adds

complexity to the system and decreases its accuracy. The developed control strategy complements the work in [28], where a height control strategy based on the recalculation of the deposition trajectories according to the mean height of the previously deposited layer was presented. This paper presents a novel methodology to apply local corrections within the layer, based on the dynamic variation of the scanning speed as a function of the height of each region. The effectiveness of the system was evidenced by the successful correction of induced local defects.

2. Materials and Methods

2.1. Description of the laser metal wire deposition (LMWD) Equipment

The LMWD cell of Figure 1 was used for the implementation of this work. The processing laser was a 4 kW Ytterbium Laser System YLS4000 (IPG Photonics, Oxford, MA, USA) and the deposition movement was achieved by an IRB4400 robot (ABB, Zurich, Switzerland). 316LSi stainless steel filler material (Lincoln Electric, Cleveland, OH, USA) in the form of 0.8 mm diameter wire was introduced by means of a wire feeder (DINSE G.m.b.H., Hamburg, Germany). The deposition head was a COAXwire (Fraunhofer IWS, Dresden, Germany), which divides the main laser beam into three beams and then focuses them again on the working plane [16]. The result is a direction-independent deposition. The 3D measurement was acquired by means of a Phoxi 3D structured light scanner (Photoneo, Bratislava, Slovakia). The distance between the scanner and the robot positioner was set at 1239 mm as the optimum value recommended by the manufacturer. The point-to-point spacing at this distance was 0.524 mm, considered as adequate for the size of the deviations in the LMWD process. The angle of the scanner with respect to the vertical was fixed at 30° in order to obtain the correct scanning of the upper part of the piece and to avoid collisions with elements of the head.

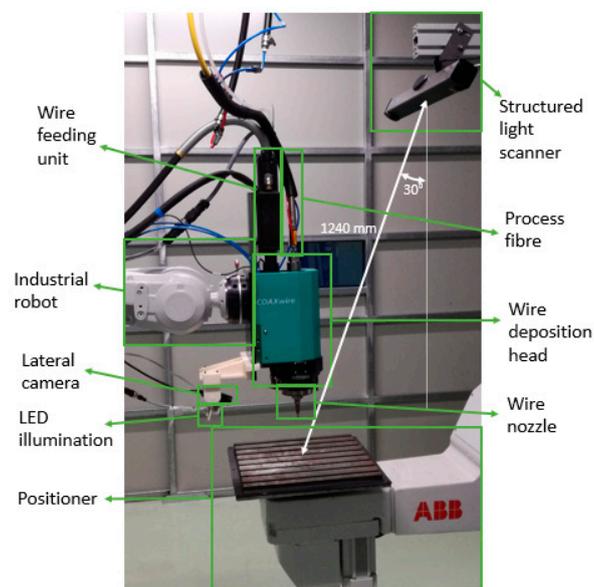


Figure 1. Experimental setup of the laser metal wire deposition (LMWD) robotic cell.

Prior to deposition, the measuring system must be calibrated to align the scanner coordinate system with the robot's coordinate system. In this procedure, the points of the target pattern are detected both by vision by the scanner and by touching the points with the robot. With the points referred to in the robot coordinate system, P_{Robot} , and scanner, $P_{Scanner}$, the transformation matrix T is calculated (Equation (1)). This matrix is applied to all the points of the subsequent scans, also referring the scan points to the robot coordinate system.

$$P_{Robot} = T \cdot P_{Scanner} \quad (1)$$

The wire feeding was also monitored continuously by means of a Genie Nano C1940 CMOS vision camera (Teledyne DALSA, Waterloo, ON, Canada) placed laterally and equipped with a visible bandpass filter, a neutral filter, and LED illumination of the work area.

2.2. Height Control Methodology

The correction strategy developed calculated the deposition trajectories layer by layer based on the height profile measured in the previously deposited layer. After the deposition of the layer, the process was stopped and the upper surface of the part was scanned. Due to the calibration procedure, the coordinates of the obtained point cloud referred to the same working coordinate system as that of the robot, so height corrections could be applied at their precise location.

In order to reduce the size of the acquired point clouds, in a first step, the points outside the work volume were removed. This reduced point processing time and therefore the stop time between layers.

Based on this scan the trajectories of the next layer were defined. In this case, the procedure of stopping the process, scanning the part, and calculating trajectories was applied for each individual layer.

A representation of the height deviation of a layer is illustrated in Figure 2a. When a layer is to be deposited, the approximate growth of the layer is known, hence the height that the part should reach after deposition is referred to as theoretical height, h_t . However, the growth of the part will not necessarily match the theoretical height, so there is an error between the scanned layer height profile, h_s , and the theoretical height (Equation (2)).

$$e = h_s - h_t \quad (2)$$

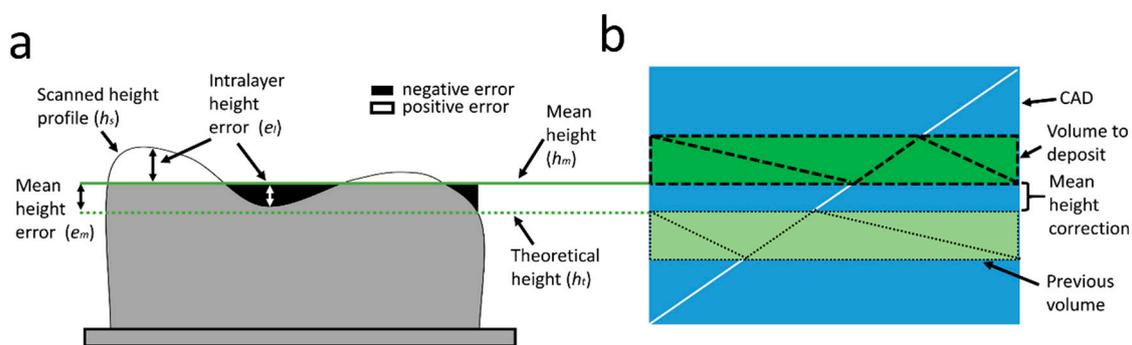


Figure 2. Mean height correction strategy and local deviations. (a) Deviations from the mean height of the piece; (b) Correction of the mean height by slicing the CAD, in STL format, starting from the mean height of the layer.

In order to avoid excessive corrections on the part that could lead to faults, the error is divided into a mean, e_m , and intra-layer, e_l , height error. The mean error is the difference between the mean height of the scanned layer, h_m , and the theoretical height, whereas the local error represents the deviation of the scanned height profile with respect to the mean height:

$$e = e_m + e_l = (h_m - h_t) + (h_s - h_m). \quad (3)$$

The control strategy is therefore applied to the height deviation in two steps:

- Mean height correction
- Local intra-layer height correction

Each correction strategy will be explained in the following sections.

2.2.1. Mean Height Correction

The mean height correction based on the robot position adjustment without considering the CAD of the part results in large differences between the theoretical and built geometries, especially in parts with complex shape [29]. Therefore, a control strategy based on the recalculation of the deposition trajectories applied in this work results in a more accurate reproduction of the theoretical geometry (CAD model).

In order to perform the mean height correction considering the geometry of the part and the scanned data, the same procedure was used as in Reference [28], where the CAD model, in STL format, of the complete part was sliced from the mean measured height to the next height to be reached after deposition of the following layer (Figure 2b). As in this work, only one layer was deposited between scans and the height of the volume to be deposited corresponded to the theoretical layer height. Then, the deposition trajectories of this STL slice were generated using a tool developed in-house [30]. Figure 3a shows the deposition path of a layer together with the scanned point cloud. The deposition pattern consisted of a zig-zag that rotated 90 degrees each layer and one external perimeter.

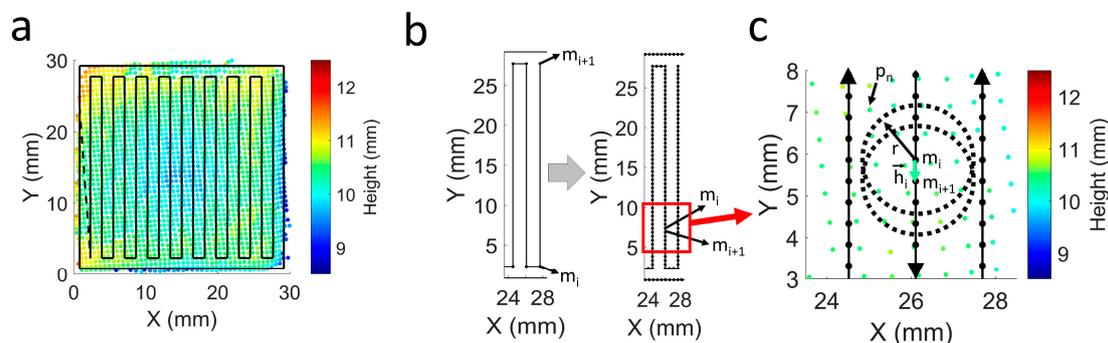


Figure 3. Local height control based on scanned height profile. (a) Scanned point cloud and deposition trajectory; (b) Discretization step in the trajectory. Left: consecutive points before discretization. Right: consecutive points after discretization; (c) Intra-layer local height control strategy.

2.2.2. Local Intra-Layer Height Correction

During experimental work it was found that the mean height correction applied to the whole layer was not sufficient to guarantee the homogeneous and robust growth of the piece. Besides the process parameters commonly referred to, such as power, scanning speed, or wire feed rate, part growth can be affected by other factors such as part heating and cooling rate in different zones, part geometry, or the dynamic precision of the robot in its movements. The importance of each of these factors is often mixed and it is difficult to distinguish their effect on the final result. This paper does not attempt to study the cause of height deviations but rather presents a methodology to control local deviations within the layer regardless of their origin.

The purpose of intra-layer height correction is to introduce more material into areas where the height is insufficient and less material where height is excessive. The principal alternatives for varying the material feed rate in different areas in LMWD are to vary the wire feeding speed or the machine (or robot) scanning speed. In this case, the choice made by the authors was to change the scanning speed, exploiting the ability to modify the deposition trajectories of the subsequent layers to be deposited. As a combined correction of the mean and local height of the layer was applied, the local intra-layer correction was based on deviations with respect to the mean height, giving rise to smoother corrections.

The deposition paths consist of linear point-to-point movements, which constitute the matrix of M coordinates with the consecutive points of the robot movement:

$$M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_i \ \dots \ m_I], m_i = \{m_{ix} \ m_{iy} \ m_{iz}\}. \quad (4)$$

To introduce local corrections, the linear movements are discretized by the insertion of intermediate points. The discretization of the trajectory is illustrated in Figure 3b, with the representation of two consecutive points, m_i and m_{i+1} , before and after the insertion of the intermediate points. The distance between points is calculated according to a value, d , entered by the user. If \vec{h}_i is defined as the vector that connects m_i and m_{i+1} , the number of points to introduce between them, n_i , is calculated as follows:

$$n_i = \text{round}\left(\left|\frac{\vec{h}_i}{d}\right|\right) - 1, \quad (5)$$

and the coordinates of the intermediate points, m_k , are then computed:

$$m_k = m_i + \frac{m_{i+1} - m_i}{n_i + 1} \cdot k, k = 1, 2, \dots, n_i. \quad (6)$$

The M matrix is then redefined by inserting the intermediate points. On the other hand, the scanning of the part originates a matrix, P , with the coordinates of the point cloud:

$$P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n \ \dots \ p_N], p_n = \{p_{n_x} \ p_{n_y} \ p_{n_z}\}. \quad (7)$$

Figure 3c shows a zoom view of the trajectory points together with the scanned point cloud and the intra-layer height control parameters. With this control methodology, the scanning speed between the newly defined m_i and m_{i+1} is determined as a function of the height profile of the scan.

A certain point in the trajectory, m_i , is not necessarily coincident with a point in the scan, p_n , so the height deviation for each trajectory point, $desv_{m_i}$, is calculated based on the z component of the scan points that are placed at a distance less than a user-defined value, r :

$$desv_{m_i} = \text{mean}(P), P = \{p_{n,z} | (p_{n,x} - m_{x_i})^2 + (p_{n,y} - m_{y_i})^2 - r^2 < 0\}. \quad (8)$$

The speed of a movement connecting two points, $v_{\vec{h}_i}$, is established by means of the diagram shown in Figure 4, taking the mean value of the deviations of the two points being connected:

$$v_{\vec{h}_i} = v_{nom} + \frac{v_{max} - v_{nom}}{desv_{max}} \cdot \frac{desv_{m_i} + desv_{m_{i+1}}}{2}, \quad (9)$$

where v_{nom} is set as the nominal speed from which the scan speed adjustments are made. The slope of the correction curve is also determined by the user-defined parameters $desv_{max}$ and v_{max} , corresponding to the maximum deviation at which the maximum speed is to be applied. These values determine the severity and stability of the corrections. If the speed change for a certain deviation is excessive, the growth of the part may change more than is necessary to reach the target height, as well as leading to large accelerations during the process. On the other hand, if the speed change entered is insufficient, a local defect may continue increasing and remain uncorrected.

Finally, speeds higher than v_{max} and lower than v_{min} are saturated:

$$v_{\vec{h}_i} = \begin{cases} v_{min}, & \text{if } v_i < v_{min} \\ v_{max}, & \text{if } v_i > v_{max} \end{cases}. \quad (10)$$

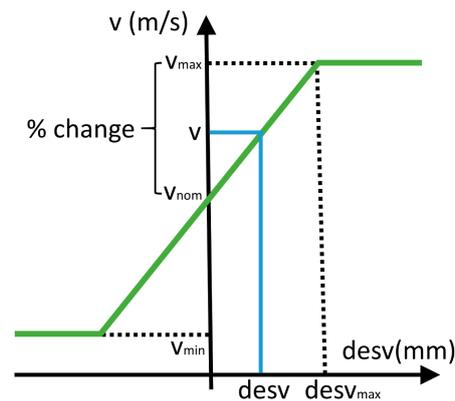


Figure 4. Diagram of scanning speed control based on local height deviation.

The setting of the nominal, maximum, and minimum speeds must also take into account the possible effect of the speed change on the final part quality, in order to guarantee homogeneous component properties and the absence of internal defects.

User-defined values d and r also influence performance of the control. Figure 5 shows the deposition trajectories calculated with various combinations of these parameters. In Figure 5a, small r and d values are chosen, resulting in a large number of points on the trajectory and the deviations being calculated with very close scan points. As a result, more localized height variations can be corrected, but the velocity changes are also more pronounced. On the other hand, in Figure 5b, a higher value of d which is also significantly higher than r is selected. This results in fewer points in the trajectories and very discrete and sudden speed changes. Finally, the parameters in Figure 5c were considered as adequate for this work, in which a relatively small value of d and a slightly larger value of r are used. In this way, moderately small deviations can be corrected with progressively changing speeds. Although a lower value of d can be introduced, the improvement may not be relevant and the calculation time of the trajectories may increase considerably.

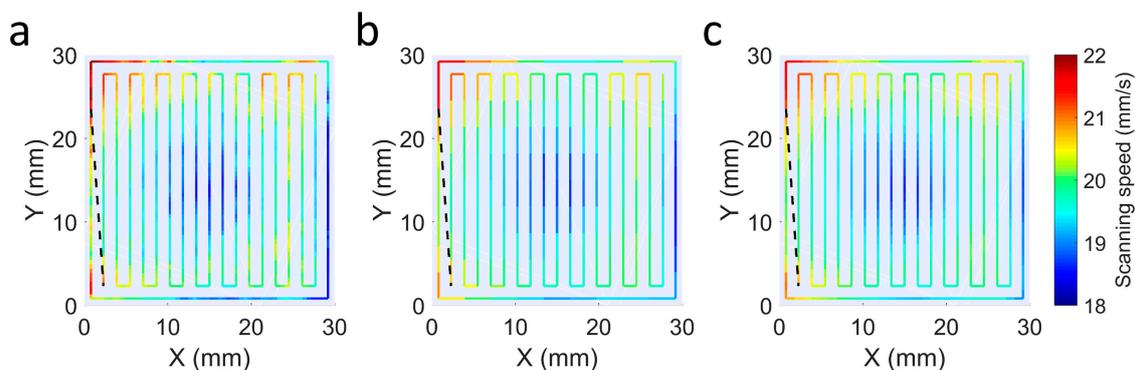


Figure 5. Deposition paths and scanning speeds for different user-entered settings d and r . (a) $d = 0.5$ mm, $r = 0.5$ mm; (b) $d = 3$ mm, $r = 1$ mm; (c) $d = 1$ mm, $r = 2$ mm.

The precision with which the trajectory positions are reached is another aspect to consider. The robot programming allows this precision to be varied in order to allow a continuous movement without speed changes. On the other hand, this means that the real trajectory of the robot does not necessarily correspond with the programmed path. This is the case for the corners of the path in Figure 3a. Although the trajectories are programmed to reach the corner of the section, reaching this point would lead to a significant reduction in the robot's speed, resulting in excessive growth in the corners. For this reason, the precision of the movement is reduced, resulting in more rounded real trajectories. This is a limitation to consider when determining the point at which corrections are made. In this work, this problem was solved by means of the parameters d and r , which softened this effect

to some extent by increasing the distance to the points used to calculate the deviations. In other cases, this aspect can be addressed, for example, by introducing more rounded corners in the trajectory that will enable an accurate movement with the programmed speed.

3. Results and Discussion

3.1. Influence of Velocity Change on Part Integrity

Initially, 25 mm × 25 mm section hexahedrons with 10 layers were manufactured. The distance between consecutive beads was specified as 1.3 mm. The deposition parameters used are given in Table 1. All parameters were kept constant except the scanning speed of the robot which was varied with respect to the nominal speed, set at 20 mm/min. The height at which each layer was deposited was adjusted based on the mean height of the previous layer. Figure 6a shows the hexahedron manufactured with the nominal speed, whereas in Figure 6a–f hexahedrons varying the speed above and below the nominal speed are presented. Note that as the scanning speed of the robot increased or decreased while maintaining the same deposition trajectories, the height of each layer and the height of the final part increased or decreased accordingly. On the other hand, although the overlap ratio was also changed as a consequence of the bead width change, the hexahedrons obtained showed an absence of pores or internal defects for every velocity.

Table 1. LMWD process parameters employed.

Laser Power (W)	Wire Feed Speed (m/min)	Wire Feed Rate (kg/h)	Protective Gas Flow Rate (L/min)	Robot Scanning Speed (mm/s)
1500	3	0.72	12	16–24

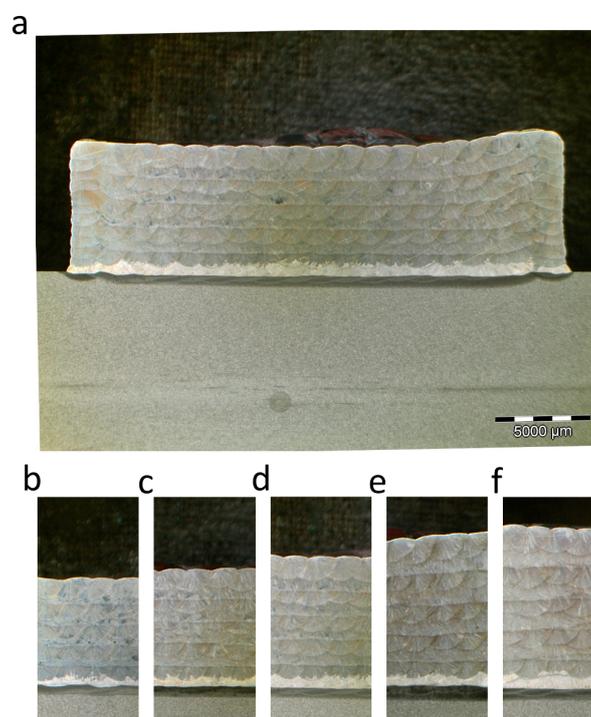


Figure 6. Cross-section of the part for different scanning speeds. (a) Complete hexahedron with nominal velocity, 20 mm/s; (b) Velocity increase of 20%, 24 mm/s; (c) Velocity increase of 10%, 22 mm/s; (d) Nominal velocity, 20 mm/s; (e) Velocity decrease of 10%, 18 mm/s; (f) Velocity decrease of 20%, 16 mm/s.

The results of the experiments have demonstrated the feasibility of adapting the scanning velocity on a part to vary the height of the deposition. Although different scanning speeds affect part heating and cooling rates, thus altering the microstructure of the final manufactured part, this aspect has not been considered in this article, considering as valid totally dense parts, with the absence of pores or cracks. In future research, the effect of these variations on the properties of the final part will be determined.

3.2. Defect Correction

Two test specimen geometries were produced to validate the effectiveness of the height correction method. The deposition parameters were again those of Table 1 and the same zig-zag and external perimeter deposition pattern was applied. Although it was proven that parts could be built with a 20% speed change with no defects, the speed in these tests was limited to 10% to soften corrections and ensure internal quality, so the value of v_{\max} was set at 22 mm/s and v_{\min} at 18 mm/s. The maximum height deviation for these limit speeds, $desv_{\max}$, was set at 1 mm.

In the first test (Figure 7a), a step-type defect was simulated. After an initial complete layer deposition, only half of the section was deposited in the second layer. In Figure 7b, the part can be seen after the correction of the step defect, resulting again in a flat surface. Figure 7c shows the height profiles of the part calculated for each layer obtained from the scans, and the provoked step defect. Finally, in Figure 7d, the evolution of the height on both sides of the part is illustrated. The step defect induced in the second layer can be seen, which results in a difference in height between the two sides of the section. This difference in height decreases along the layers until it becomes negligible in the 12th layer.

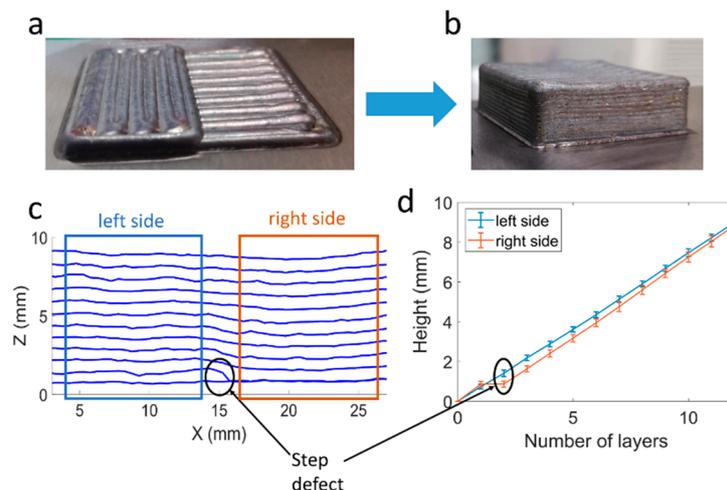


Figure 7. Step defect correction. (a) Provoked step defect; (b) Part after error correction; (c) Height profile for each layer; (d) Height evolution for the left and right sides of the part. Mean height and standard deviation.

In the second demonstrator (Figure 8a), a pocket-shaped defect was generated. Again, the result of scanning speed control is shown in Figure 8b, in which after a certain number of layers a flat deposition was restored. The pocket defect, consisting of two layers of difference with respect to the top layer height, was produced deliberately (Figure 8c). The evolution of the height for the pocket and for the external zone is reflected in Figure 8d. In this case, the height difference in the third layer was larger, so it was not until the 19th layer that the height of the entire layer was almost levelled.

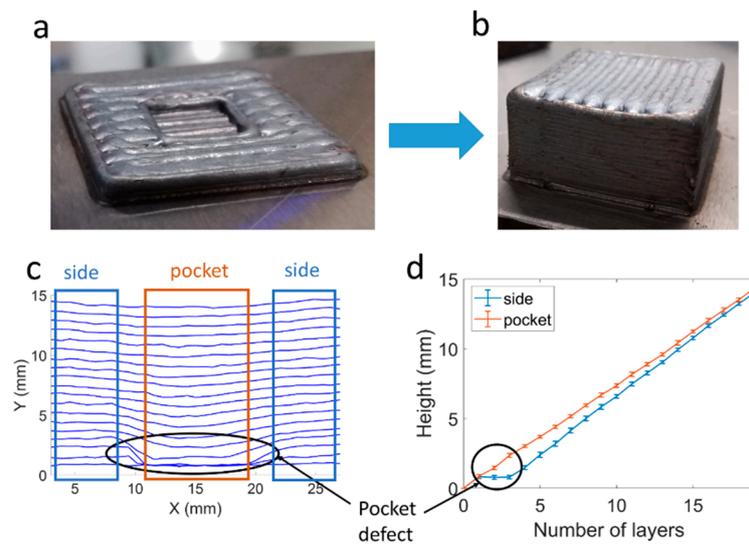


Figure 8. Pocket defect correction. (a) Provoked pocket defect; (b) Part after error correction; (c) Height profile for each layer; (d) Height evolution for the central and external zones of the piece. Mean height and standard deviation.

In order to verify that the correction had been applied without compromising the integrity of the part, the corrected samples were cut to analyze possible internal defects. Figure 9 shows a detailed view of the defect correction, in which no interior defect can be seen either in the case of the step defect (Figure 9a) or in the pocket defect (Figure 9b).

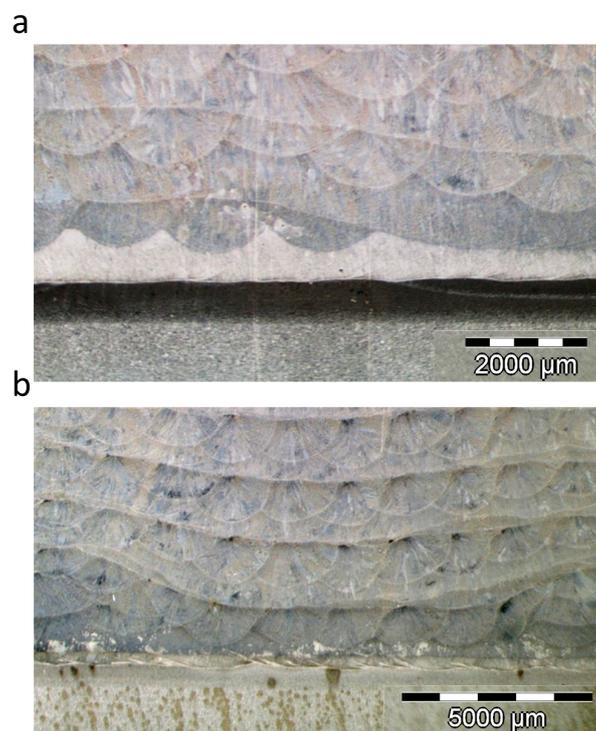


Figure 9. Cross-sections of the samples showing a detailed view of the defect correction. (a) Step defect correction; (b) Pocket defect correction.

By combining the mean layer height correction and local deviations, it was possible to re-establish a constant layer height. While the method presented in this paper was applied to provoked defects, the height correction method developed will be employed in future work on larger parts in order

to maintain stability during manufacture. As further points to be developed, the measurement and control strategy will be applied to different geometries and materials, as well as analyzing their effect on the properties of the part.

4. Conclusions

A novel in-process height control methodology was developed in the LMWD process based on the measurement of the part by means of a structured light scanner resulting in the correction of intra-layer defects.

The height correction was implemented in two steps. On the one hand, the average height of the deposited layer was corrected according to the scanned height profile of the workpiece and the reference CAD geometry. On the other hand, the control of the local deviations was based on the variation of the scanning speed of the robot. As a result, it was possible to adapt the deposition rate and therefore the bead height according to the height of each scanned zone.

In order to prove the effectiveness of the height control strategy, defects were provoked to simulate an irregular growth in different areas of the part. The performance of the control was tested, experimentally analyzing how planar layers were re-established after a certain number of deposited layers.

The methodology proved to be adequate to correct local intra-layer defects. The internal integrity of the part and the absence of defects was also verified in order to validate the process control methodology based on scanning speed variation.

The recalculation of layer-by-layer deposition paths and the combination of mean layer height error corrections and local corrections resulted in a reliable method for introducing the methodology into LMWD manufacturing environments. Although the calibration process, communications, or trajectory programming may be dependent on the manufacturing environment or scanner used, it is considered that the methodology presented is applicable to different machine configurations and measurement systems.

Future research will evaluate the degree to which the system is appropriate for other geometries and materials.

Author Contributions: Conceptualization, I.G. and J.P.; methodology, I.G.; software, I.G. and J.F.; validation, I.G. and M.M.; formal analysis, I.G.; investigation, I.G.; resources, J.P. and A.L.; data curation, I.G.; writing—original draft preparation, I.G.; writing—review and editing, J.P.; visualization, J.P.; supervision, J.P. and A.L.; project administration, J.P.; funding acquisition, J.P.

Funding: The authors wish to acknowledge the financial support given by IHOBE and the ERDF through the Addieco project and by the Basque Government through the Addisend project which is part of the Elkartek 2018 programme.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Toyserkani, E.; Khajepour, A.; Corbin, S. *Laser Cladding*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2004; ISBN 9780849321726.
2. Thomas, D.; Gilbert, S. *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*; NIST Special Publication; NIST: Gaithersburg, MD, USA, 2014; Volume 1176, pp. 1–77.
3. Zhang, L.C.; Attar, H. Selective laser melting of titanium alloys and titanium matrix composites for biomedical applications: A Review. *Adv. Eng. Mater.* **2016**, *18*, 463–475. [[CrossRef](#)]
4. Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2015**, *81*, 465–481. [[CrossRef](#)]
5. Mani, M.; Lane, B.M.; Donmez, M.A.; Feng, S.C.; Moylan, S.P. *Measurement Science Needs for Real-Time Control of Additive Manufacturing Metal Powder Bed Fusion Processes*; U.S. Department of Commerce: Washington, DC, USA, 2016.

6. Everton, S.K.; Hirsch, M.; Stravroulakis, P.; Leach, R.K.; Clare, A.T. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Mater. Des.* **2016**, *95*, 431–445. [[CrossRef](#)]
7. Stavropoulos, P.; Chantzis, D.; Doukas, C.; Papacharalampopoulos, A.; Chryssolouris, G. Monitoring and control of manufacturing processes: A review. *Procedia CIRP* **2013**, *8*, 421–425. [[CrossRef](#)]
8. Hofman, J.T.; Pathiraj, B.; Van Dijk, J.; De Lange, D.F.; Meijer, J. A camera based feedback control strategy for the laser cladding process. *J. Mater. Process. Technol.* **2012**, *212*, 2455–2462. [[CrossRef](#)]
9. Hu, D.; Mei, H.; Tao, G.; Kovacevic, R. Closed loop control of 3d laser cladding based on infrared sensing. In Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA, 6–8 August 2001; pp. 129–137.
10. Ocylok, S.; Alexeev, E.; Mann, S.; Weisheit, A.; Wissenbach, K.; Kelbassa, I. Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring. *Phys. Procedia* **2014**, *56*, 228–238. [[CrossRef](#)]
11. Colodrón, P.; Fariña, J.; Rodríguez-Andina, J.J.; Vidal, F.; Mato, J.L.; Montealegre, M.Á. FPGA-based measurement of melt pool size in laser cladding systems. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, Poland, 27–30 June 2011; pp. 1503–1508.
12. Bi, G.; Gasser, A.; Wissenbach, K.; Drenker, A.; Poprawe, R. Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding. *Opt. Lasers Eng.* **2006**, *44*, 1348–1359. [[CrossRef](#)]
13. Hu, D.; Kovacevic, R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2003**, *43*, 51–60. [[CrossRef](#)]
14. Baufeld, B.; Brandl, E.; Biest, O. Van Der Journal of Materials Processing Technology Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. *J. Mater. Process. Tech.* **2011**, *211*, 1146–1158. [[CrossRef](#)]
15. Wu, Q.; Lu, J.; Liu, C.; Shi, X.; Ma, Q.; Tang, S.; Fan, H.; Ma, S. Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing. *Mater. Manuf. Process.* **2017**, *32*, 1881–1886. [[CrossRef](#)]
16. Pajukoski, H.; Näkki, J.; Thieme, S.; Tuominen, J.; Nowotny, S.; Vuoristo, P. High performance corrosion resistant coatings by novel coaxial cold- and hot-wire laser cladding methods. *J. Laser Appl.* **2016**, *28*, 12011. [[CrossRef](#)]
17. Motta, M.; Demir, A.G. High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition. *Addit. Manuf.* **2018**, *22*, 497–507. [[CrossRef](#)]
18. Jianjun, S.; Ping, Z.; Geyan, F.; Shihong, S. Geometry characteristics modeling and process optimization in coaxial laser inside wire cladding. *Opt. Laser Technol.* **2018**, *101*, 341–348. [[CrossRef](#)]
19. Kotar, M.; Govekar, E. The influence of the workpiece illumination proportion in annular laser beam wire deposition process. *Procedia CIRP* **2018**, *74*, 228–232. [[CrossRef](#)]
20. Bambach, M.; Sizova, I.; Silze, F.; Schnick, M. Comparison of laser metal deposition of Inconel 718 from powder, hot and cold wire. *Procedia CIRP* **2018**, *74*, 206–209. [[CrossRef](#)]
21. Zhu, G.; Li, D.; Zhang, A.; Pi, G.; Tang, Y. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition. *Opt. Laser Technol.* **2012**, *44*, 349–356. [[CrossRef](#)]
22. Irvani-Tabrizipour, M.; Toyserkani, E. An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height. *Mach. Vis. Appl.* **2007**, *18*, 343–354. [[CrossRef](#)]
23. Song, L.; Bagavath-Singh, V.; Dutta, B.; Mazumder, J. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2012**, *58*, 247–256. [[CrossRef](#)]
24. Davis, T.A.; Shin, Y.C. Vision-based clad height measurement. *Mach. Vis. Appl.* **2011**, *22*, 129–136. [[CrossRef](#)]
25. Donadello, S.; Motta, M.; Demir, A.G.; Previtali, B. Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation. *Opt. Lasers Eng.* **2018**, *112*, 136–144. [[CrossRef](#)]
26. Buhr, M.; Weber, J.; Wenzl, J.-P.; Möller, M.; Emmelmann, C. Influences of process conditions on stability of sensor controlled robot-based laser metal deposition. *Procedia CIRP* **2018**, *74*, 149–153. [[CrossRef](#)]
27. Heralić, A.; Christiansson, A.-K.; Lennartson, B. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. *Opt. Lasers Eng.* **2012**, *50*, 1230–1241. [[CrossRef](#)]
28. Garmendia, I.; Pujana, J.; Lamikiz, A.; Flores, J.; Madarieta, M. Structured light-based height control for Laser Metal Deposition. *J. Manuf. Process.* **2019**. under review.

29. Garmendia, I.; Leunda, J.; Pujana, J.; Lamikiz, A. In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning. *Procedia CIRP* **2018**, *68*, 375–380. [[CrossRef](#)]
30. Flores, J.; Garmendia, I.; Pujana, J. Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2018**. [[CrossRef](#)]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

Anexo 3: In-process height control during laser metal
deposition based on structured light 3D scanning

Artículo en *Procedia CIRP Volume 68, 2018, Pages 375-380.*

Autores: I. Garmendia, J. Leunda, J. Pujana, A. Lamikiz.

DOI: [10.1016/j.procir.2017.12.098](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.098).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23-27 April 2018, Bilbao, Spain

In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning

Iker Garmendia^{a,*}, Josu Leunda^a, Joseba Pujana^a, Aitzol Lamikiz^b

^a*IK4-TEKNIKER, Mechanical Engineering Unit, Iñaki Goenaga 5, Eibar 20600, Spain*

^b*University of the Basque Country, ETSII, Department of Mechanical Engineering, Alameda de Urquijo s/n, Bilbao 48013, Spain*

* Corresponding author. Tel.: +34-943-206-744 ; fax: +34-943-202-744. E-mail address: iker.garmendia@tekniker.es

Abstract

Laser metal deposition is an additive manufacturing process capable of layer by layer construction of solid parts. An incorrect deposition distance between nozzle and substrate can result in height deviations from the ideal building path. The error can be propagated along layers, leading to an irreversible defect. Maintaining an optimal distance between the nozzle and the substrate is therefore a critical aspect. This paper introduces an off-line geometric control system for in-process measurement and build path correction. A structured light based 3D scanner measures the build height from an external, fixed position, providing more precise results than moving measuring systems. The deposition is stopped in certain stages of the process and the piece is scanned generating a three-dimensional point cloud. Processing of the collected data allows the build height determination. A control algorithm was developed to take corrective actions in accordance with the measured error. The system enables an accurate control of the generated geometry and permits the comparison with the original computer design. This approach reduces the required human supervision during the process and the occurrence of non-valid parts. The effectiveness of the method was proved through the contrast of parts built with and without control, showing a more accurate reproduction of the generated solid parts when corrections are applied.

© 2018 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining

Keywords: Laser Metal Deposition (LMD); additive manufacturing; control; monitoring; structured light; 3D scanning; metrology

1. Introduction

Laser Metal Deposition (LMD) is an AM technique based on the layer upon layer construction of three-dimensional solid parts. In this process, the raw material consists in metal powder or wire that is introduced into the processing zone and melted by a high power laser beam. The process offers the opportunity to build complex geometries with enhanced design freedom and reduced waste of material since the resulting geometry is close to the final product or “near net shape”. These characteristics make the LMD interesting for low volume production, high value component repair or rapid prototyping.

However, the high sensibility of the manufacturing conditions to small changes of the input parameters makes necessary the monitoring and control of the process [1]. The goal of monitoring and controlling the fabrication is to assure the geometrical and thermal stability of the deposited parts, in order to obtain a fully dense result with high mechanical

properties and absence of internal defects such as pores or cracks. A review of different monitoring methods is presented in [2]. Due to the high temperature of the samples, non-contact measuring systems are preferred, collecting the thermal and optical radiation from the processing zone. As it can be seen in [3], even if some authors use acoustic emissions or pirometry to relate the acquired signals with the appearance of defects, most of the works include CCD, CMOS or IR cameras.

In [4-9] a camera is mounted on the laser head to get images of the molten pool coaxially to the laser beam. With this set-up, a direction independent measurement of the melt pool width is obtained, which can be used for the temperature and bead width control. Some authors also place a camera off-axis [10-15]. Although this set-up involves a direction dependency, it gives the opportunity to measure both the width and the height of the molten pool at the same time [16-21]. In [22] a laser displacement sensor is mounted on the laser head to track the height profile of the deposited layer, and determine the

powder feed rate profile for the next layer. A combination of different measuring methods is developed in [23]. While the width of the molten pool is measured with a coaxially mounted camera, a low power laser line is projected onto the previously deposited layer and a camera mounted in front estimates the clad height in single bead walls. Since the cameras installed in all these papers are placed in a fixed position on the laser head, it is expected to experience measurement differences when changing the deposition direction or when a complex design is being built.

The direction independence in the measurement seems to be an interesting feature, but there are few works with practical solutions. In [24] the process is stopped between each layer deposition, and a laser line scanner mounted on the laser head obtains the height profile of the top layer. Although this is an off-line procedure, it offers a reliable measurement that can be used to correct the deposition of the following layers.

In this paper, a structured light scanner is installed in a fixed position and the height profile of the piece is obtained in a single scan in certain stages of the building. This set-up eases the installation and eliminates the positioning error of the robot from the measurements. Based in the measured height, a control strategy consisting of adding or deleting the necessary amount of layers is applied. Deposition trajectories with different distance between layers are fabricated with and without corrections, proving the effectiveness of the method.

2. Outlook of height measurement in AM

The choice of the measuring system is closely related to the control strategy used. Control strategies commonly used in AM process are described in [25]. The control method in which the information flows only in the forward direction is named feedforward. Although it is apparently simple, an expert operator is needed to correctly adjust the input parameters and make small adjustments during the process. As an alternative solution, a feedback control is suggested, in which input parameters are changed according to the measurement of one or more outputs of the process. This kind of control is also divided in two subtypes, fine feedback and coarse feedback. In the first one, parameters like melt pool temperature, melt pool geometry and build geometry can be measured in-situ, allowing real-time corrections of the process parameters. By contrast, with coarse feedback, the deposition is stopped in certain stages of the process and corrections are applied to the following layers.

2.1. CCD and CMOS cameras

The reason why the most widely used monitoring device is a camera is that it is an economical solution that can be used for a fine feedback control, providing almost immediate corrections to deviations from the ideal conditions without stopping the process. With the correct selection of filters and lenses, the geometry of the pool, its temperature or the build height can be monitored. The human supervision is therefore reduced and the part quality and repeatability increases.

Nevertheless, they introduce complexity to the system and the maintenance need augments. The calibration is another

aspect to face, as it might require a modification if input parameters are changed. In addition, until now there has not been presented a solution to measure complex geometries with direction independence in a reliable way, and most of the works are applied to simple geometries such as single bead walls.

2.2. Laser spot and laser line scanners

This kind of sensors project a low power laser spot or line onto the object to measure, and a camera acquires images of the projection. As all the distances and angles of the device are known, the distance to the object is calculated through triangulation. Mounting the scanner on the deposition head allows getting the three-dimensional representation of the object. Consequently, the measurement error will always be higher than the precision of the positioning system.

Actual commercial devices do not withstand the aggressive conditions of the LMD process so they must be protected during deposition and it is only possible to take measurements when the process is stopped. This only allows the use of coarse feedback control strategies. In face of this, they offer a more reliable and precise measurement than melt pool imaging with a camera, the calibration of the system is reduced since it does not depend on deposition parameters, and there are no geometric limitations in the constructed parts. The higher price of the equipment and the complexity of the additional movement needed for the 3D scanning are the main limitations of this solution.

2.3. Structured light 3D imaging

Instead of a line, structured light 3D imaging devices project different patterns into the object and use a coding strategy to determine the depth of each measured point. With this arrangement, a three-dimensional point cloud of the piece can be obtained in a single scan, and because the device is fixed in a static position, the error induced by the movement is removed from the measurements. As with laser line scanners, due to the aggressive conditions of the process, only coarse feedback control is feasible with structured light scanners at the moment. The precision of the measurements strongly depends on the calibration of the equipment according to the measured volume, but an acceptable precision can be obtained with an economical equipment.

3. Experimental set-up

3.1. LMD equipment

The experiment was conducted using a 2.2 kW diode pumped continuous wave Rofin DY022 Nd:YAG laser. The laser beam was guided to the working area by a 0.6 mm diameter circular fiber and an optical head by Precitec. The powder was injected into the melt pool through a three hole coaxial nozzle made by IK4-TEKNIKER (Fig. 1). The movement of the laser head was provided by a 6-axis ABB 4400 robot.

Metco 42C martensitic stainless steel powder, delivered by a Sulzer Metco Twin-10 C powder feeder, was laser deposited on a 10 mm thick C45E carbon steel substrate.



Fig. 1. LMD deposition nozzle made by IK4-TEKNIKER.

3.2. Monitoring system

A HP SLS3 structured light based 3D scanner was chosen as the measuring system. With a correct calibration, a 0.05 mm precision can be obtained in the scanned volume. The scanner was placed in a fixed position, at a distance of 300 mm away from the specimen, with a field of view that permitted the scanning of the top layer during the whole process. Before the deposition of the first layer, an initial scan of the base was performed and a plane was fitted to the captured points by least squares adjustment. A coordinate system was created with two vectors contained in the plane as X and Y coordinate axes and the normal to the plane as Z axis. This coordinate system was then used to translate and rotate each scan and calculate the height at different stages of the process.

4. Trajectory generation

First of all, the deposition path was calculated from the CAD model in a trajectory generator tool programmed in Matlab. Based in previous knowledge, the overlap of consecutive beads was fixed to 40% of a single bead width, which has a value of 1.3 mm. One external perimeter was made at the beginning of every layer and a zigzag trajectory filled the inner section. With the proper values of overlaps, a uniform height could be achieved in each layer. The starting point of the perimeters was chosen randomly, avoiding the formation of defects in consecutive layers. In Fig. 2 the deposition and air movements of a single layer and the complete part are shown.

The habitual procedure for determining the layer height is through previous tests that are composed of individual beads, single bead walls and solid geometries. A typical issue is the fact that even with a good approximation of the layer height, there can be important differences when applying them to the definitive part. One advantage of the control method presented in this paper is that although the layer height have not been optimally defined, the deposition is kept under control.

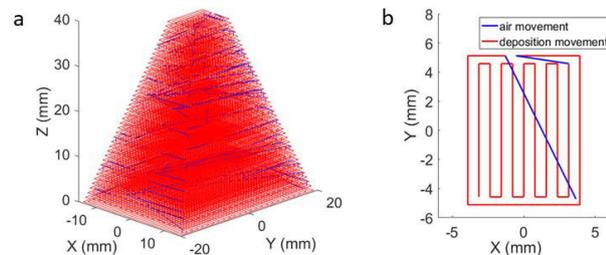


Fig. 2. (a) Deposition path of the 3D CAD model; (b) Top layer deposition.

During the deposition with the ideal distance between nozzle and substrate, the growth of each layer (real layer height) is of approximately 0.75 mm. Trajectories with three different distances between layers (theoretical layer height) were tested; bigger, smaller and slightly smaller than the real layer height. Every case was performed with and without control. A summary of the cases is presented below:

- Case a: 0.3 mm theoretical layer height without control.
- Case b: 0.3 mm theoretical layer height with control.
- Case c: 1 mm theoretical layer height without control.
- Case d: 1 mm theoretical layer height with control.
- Case e: 0.7 mm theoretical layer height without control.
- Case f: 0.7 mm theoretical layer height with control.

5. Measurement and control strategy

A scheme of the procedure followed in the process is shown in Fig.3. The closed loop of the manufacturing process is represented by the dashed line rectangle and is detailed in Fig.4.

The measurement of the part requires a stop in the process, so it is important to determine the number of layers, n , to deposit between each stop, which is set depending on the introduced theoretical layer height. In this case, groups of ten layers were deposited for cases a and b, groups of three layers for cases c and d and groups of five layers for cases e and f.

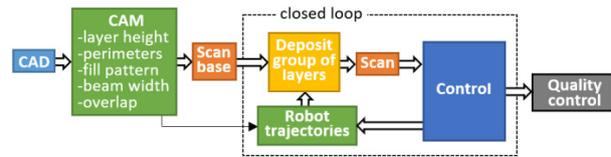


Fig. 3. Process scheme with the control strategy.

After the deposition of a group of layers, a scan of the last deposited layer is performed. The control software calculates the height error as the difference between the theoretical layer height, h_t , and the real layer height, h_r . If the sign of the error is positive, n_r layers are removed and the next group of n layers is deposited. On the contrary, if the error is negative, the last layer is repeated n_a times and the part is scanned again. In both cases the number of layers, n_a or n_r , is calculated dividing the error by the theoretical layer height, and rounding the result to obtain a whole number. The loop finishes when the final height of the part is obtained.

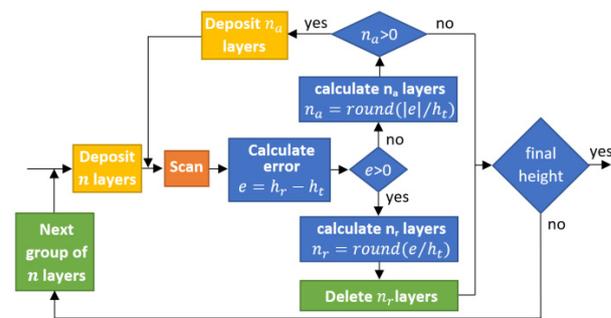


Fig. 4. Closed loop used during the manufacturing process.

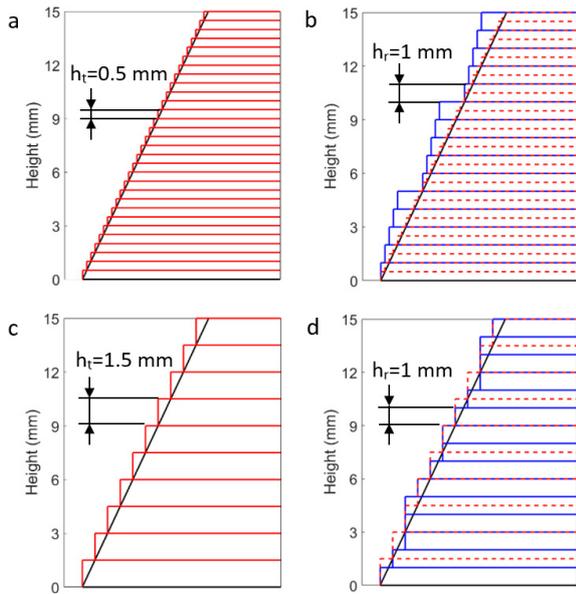


Fig.5. (a) 0.5 mm theoretical layer height; (b) 0.5 mm theoretical layer height and expected layer growth of 1 mm. Corrections every five layers; (c) 1.5 mm theoretical layer height; (d) 1.5 mm theoretical layer height and expected layer growth of 1 mm. Corrections every three layers.

When there is a deviation from the expected height, it is automatically corrected and it is not propagated to the next group of layers. Pieces constructed with LMD have poor surface finish so they require machining before getting the final shape. However, a fine correspondence of the generated part with the CAD avoids geometrical disturbances and reduces the post-building machining. In hard to machine and expensive materials this is an important aspect, since costs derived from the waste of material and tool wear can be highly reduced.

An ideal simulation of the introduced corrections is presented in Fig. 5. To ease the example, the deposited or real layer height is supposed to be 1 mm.

In Fig. 5a a 0.5 mm theoretical layer height has been introduced in the deposition path generator. Fig. 5b shows the expected growth during the process, with the real layer height of 1 mm. After the building of each group of five layers the build height is measured and some layers are deleted.

Fig. 5c shows the layers with a 1.5 mm theoretical layer height. After each group of three layers, the last layer is repeated until the expected height is obtained (Fig. 5d).

In both cases, the built geometry is similar to the final product and therefore, little post-machining is required. These examples are presented in an ideal way, but after a distortion occurs, the real layer height may vary.

6. Results and discussion

In this section parts constructed with the six explained cases are presented. The difference between the measured height and the theoretical build height, or height error, is presented in graphs. After the deposition of the pieces, the geometry was scanned and a comparison with the CAD was made with the GOM inspect software. The deviations can be easily compared since all cases have the same color scale.

6.1. Case a. 0.3 mm layer height without control

In this case the theoretical layer height was smaller than the real layer height. It was observed that when the substrate gets closer to the nozzle, the process differs from the ideal conditions, so less powder is melted by the laser beam. Due to this fact, the real height of each layer is reduced, which somewhat compensates the positioning error of the laser head. After a fast rise of the error in the first layers, the process was stable with a nearly constant height error, and low porosity was obtained in the part. However, the time to fabricate the piece was longer since more layers were necessary, and the waste of powder was excessive. Furthermore, there is a distortion in the generated geometry (Fig. 6) since the section at a given height of the part corresponds to the deposition path of a lower layer.

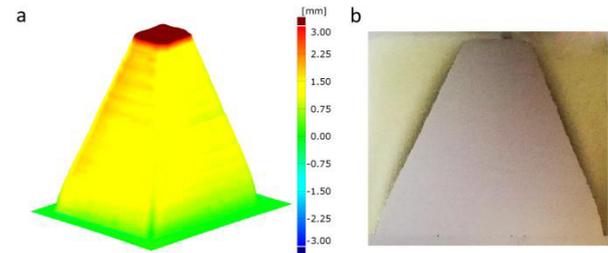


Fig. 6. Part built without control and 0.3 mm theoretical layer height. (a) Deviation from CAD; (b) Section of the constructed geometry.

6.2. Case b. 0.3 mm layer height with control

A 0.3 mm theoretical layer height was tested again, now with the control strategy. Because the built geometry tended to be higher than the theoretical height, after each group of layers, some layers were deleted before the next group was introduced. This corresponds to the appreciable steps of the part represented in Fig. 7. The porosity of the piece was low as in case a.

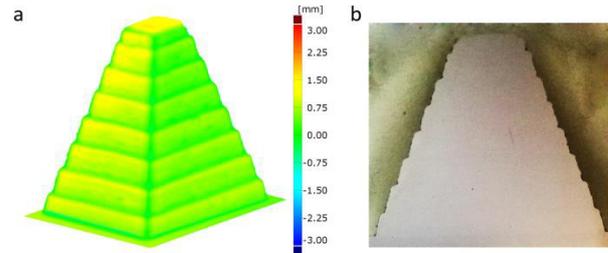


Fig. 7. Part built with control and 0.3 mm theoretical layer height. (a) Deviation from CAD; (b) Section of the constructed geometry.

Fig. 8 shows the height error plotted against the measured height for parts built with 0.3 mm theoretical layer height with and without control. It can be noticed that the height error grew sharply in the first layers, then keeping a nearly constant value of 3.6 mm. In the part made with control, when the part was measured and some layers were deleted, the error was reduced to a value close to zero. After the correction, the optimal distance was almost recovered, so these steps should not have an effect in the part integrity, and they would be removed in the post-machining. On the other hand, they would be a way of

minimizing the post-machining time and the removed material. The number of layers was reduced from 134 in the without control case to 75 when applying corrections, shortening also the deposition time and reducing the waste of powder.

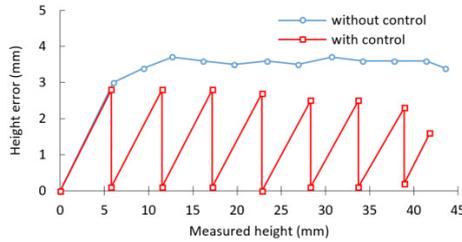


Fig. 8. Height error as a function of measured build height for 0.3 theoretical layer height with and without corrections.

6.3. Case c. 1 mm layer height without control

The real layer height in this case was smaller than the theoretical layer height. The built geometry differed from the CAD model in early stages of the deposition, and the final height of 40 mm was not reached (Fig. 9). Comparing to case a, this situation turned to be more undesirable. It has been previously explained that the height error when the nozzle is too close to the substrate keeps a nearly constant value. On the other hand, it gets unstable when the introduced theoretical layer height is excessive, and the failure of the deposition may occur. However, low porosity was observed again.

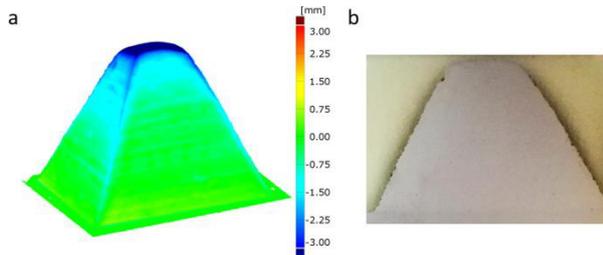


Fig. 9. Part built without control and 1 mm theoretical layer height. (a) Deviation from CAD; (b) Section of the constructed geometry.

6.4. Case d. 1 mm layer height with control

The control strategy was applied with the 1 mm theoretical layer height. When the height error was detected, the last layer was repeated until the theoretical height was obtained.

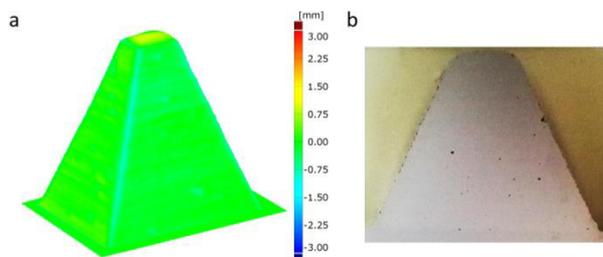


Fig. 10. Part built with control and 1 mm theoretical layer height. (a) Deviation from CAD; (b) Section of the constructed geometry.

As it can be seen in Fig. 10, a near net shape construction was obtained again with the control strategy. However, some pores were detected, so it can be concluded that setting a theoretical layer high bigger than the real layer height leads to a non-optimum situation. Hence, a theoretical layer height smaller than the real layer height reduces the porosity and promotes the process stability.

The comparison of the controlled and uncontrolled cases is shown in Fig. 11. The error in the uncontrolled case grew rapidly, while it maintained a controlled value when corrections were applied. The number of layers with the control strategy was increased from 40 to 57, which means that 17 corrective layers were introduced.

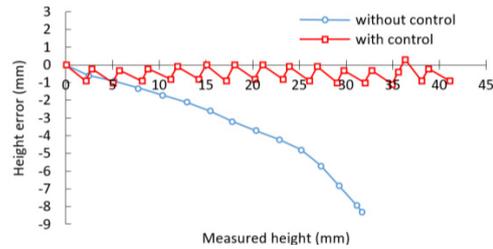


Fig. 11. Height error as a function of measured build height for 1 mm theoretical layer height with and without corrections.

6.5. Case e. 0.7 mm layer height without control

Previous parts were fabricated with parameters highly different from the real growth of each layer. In fact, it is usual to approximately know the real layer height from previous depositions. For this reason, a 0.7 mm theoretical layer height was tested, which was supposed to be just slightly smaller than the real layer height. Considering the results from previous cases, this seems to be the most efficient situation.

Setting a theoretical layer height of 0.7 mm, there was a good correspondence of the built part with the CAD model, even without introducing corrections, as it is displayed in Fig. 12. Although the porosity over the section was lower than in case d, one big pore was detected in the analyzed cross section.

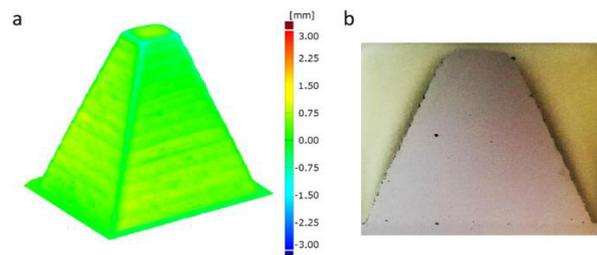


Fig. 12. Part built without control and 0.7 mm theoretical layer height. (a) Deviation from CAD; (b) Section of the constructed geometry.

6.6. Case f. 0.7 mm layer height with control

The geometry of case e seems to be close enough to the computer design, but with the application of the control strategy, a better correspondence to the CAD model was reached (Fig. 13).

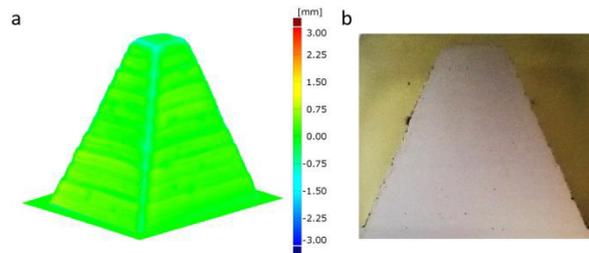


Fig. 13. Part built with control and 0.7 mm theoretical layer height. (a) Deviation from CAD; (b) Section of the constructed geometry.

As it can be seen in the graph of Fig. 14, the error in the controlled case grew smoothly, and with the deposition of more layers, it would predictably had grown until reaching a constant value as in case *a*. With the use of the correction strategy, the height error was maintained below 0.7 mm, and the number of layers was reduced from 57 to 52. Again, only some small pores were identified.

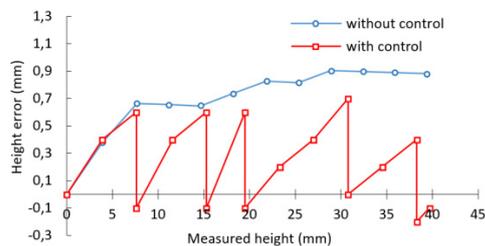


Fig. 14. Height error as a function of measured build height for 0.7 mm theoretical layer height with and without corrections.

7. Conclusion

A measuring and control procedure based on structured light scanning has been set up in an AM robotic cell. The benefit of measuring and controlling the build height during the process was proved. A closer reproduction of the computer design was obtained, which eases the post-machining and finishing of the piece. In addition, the manufacturing time was optimized, modifying the number of layers according to the measured height error.

It was also demonstrated that it is preferable to introduce a theoretical layer height slightly smaller than the real growth of an individual layer. In that situation, the deposition was kept stable and a low porosity was obtained. However, the number of layers to deposit increased, so it is important to reach a balance between the material and time resources used and the integrity of the obtained product.

In this work, the deposition trajectories were generated before the deposition and they were not changed during the process. In future developments, the modification of the trajectories, based in the measured height, will be investigated.

References

[1] Mani M, Lane BM, Donmez MA, Feng SC, Moylan SP. Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes; 2016.

[2] Everton SK, Hirsch M, Stravroulakis P, Leach RK, Clare AT. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Mater Des* 2016;95:431–445.

[3] Purtonen T, Kalliosaari A, Salminen A. Monitoring and adaptive control of laser processes. *Phys Procedia* 2014;56:1218–1231.

[4] Bi G, Gasser A, Wissenbach K, Drenker A, Poprawe R. Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding. *Opt Lasers Eng* 2006;44:1348–1359.

[5] Bi G, Schürmann B, Gasser A, Wissenbach K, Poprawe R. Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors. *Int J Mach Tools Manuf* 2007;47:555–561.

[6] Hofman JT, Pathiraj B, Van Dijk J, De Lange DF, Meijer J. A camera based feedback control strategy for the laser cladding process. *J Mater Process Technol* 2012;212:2455–2462.

[7] Hu D, Kovacevic R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. *Int J Mach Tools Manuf* 2003;43:51–60.

[8] Ocylok S, Alexeev E, Mann S, Weisheit A, Wissenbach K, Kelbassa I. Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring. *Phys Procedia* 2014;56:228–238.

[9] Colodrón P, Fariña J, Rodríguez-Andina JJ, Vidal F, Mato JL, Montealegre MÁ. FPGA-based measurement of melt pool size in laser cladding systems. *Proc Int Symp Ind Electron IEEE* 2011:1503–1508.

[10] Bardin F, McBride R, Moore A, Morgan S, Williams S, Jones JDC, Hand DP. Real time temperature measurement for process monitoring of laser conduction welding. *Proc Int Congr Appl Lasers Electro-Optics* 2004:1–24.

[11] Doubenskaia M, Pavlov M, Grigoriev S, Smurov I. Definition of brightness temperature and restoration of true temperature in laser cladding using infrared camera. *Surf Coat Technol* 2013;220:244–247.

[12] Smurov I, Doubenskaia M, Zaitsev A. Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation. *Surf Coatings Technol* 2013;220:112–121.

[13] Pavlov M, Novichenko D, Doubenskaia M. Optical diagnostics of deposition of metal matrix composites by laser cladding. *Phys Procedia* 2011;12:674–682.

[14] Lewis A, Gardner M, McElroy A, Milner T, Fish S, Beaman J. In-Situ Process Monitoring and Ex-Situ Part Quality Assessment of Selective Laser Sintering Using Optical Coherence Tomography. *Proc Solid Freef Fab Symp* 2016; 1397–1411.

[15] Smurov I, Doubenskaia M, Grigoriev S, Nazarov A. Optical monitoring in laser cladding of Ti6Al4V. *J Therm Spray Technol* 2012;21:1357–1362.

[16] Seltzer D, Schiano JL, Nassar AR, Reutzel EW. Illumination and Image Processing for Real-Time Control of Directed Energy Deposition Additive Manufacturing. *Proc Solid Freef Fab Symp* 2016, 1479–1486.

[17] Irvani-Tabrizipour M, Toyserkani E. An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height. *Mach Vis Appl* 2007;18:343–354.

[18] Fathi A, Khajepour A, Toyserkani E, Durali M. Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller. *Int J Adv Manuf Technol* 2006;35:280–292.

[19] Toyserkani E, Khajepour A. A mechatronics approach to laser powder deposition process. *Mechatronics* 2006;16:631–641.

[20] Meriaudeau F, Truchetet F, Grevey D, Vannes AB. Laser Cladding process and image processing. *J Laser Eng*. 1997;6:161–187.

[21] Song L, Bagavath-Singh V, Dutta B, Mazumder J. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process. *Int J Adv Manuf Technol* 2012;58:247–256.

[22] Tang L, Ruan J, Sparks TE, Landers RG, Liou F. Layer-to-layer height control of Laser Metal Deposition processes. *J Manuf Sci Eng* 2011;133:473–494.

[23] Heralić A, Christiansson AK, Ottosson M, Lennartson B. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. *Opt Lasers Eng* 2010;48:478–485.

[24] Heralić A, Christiansson A-K, Lennartson B. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. *Opt Lasers Eng* 2012;50:1230–1241.

[25] Seufzer WJ, Taminger KM. Control Methods for the Electron Beam Free Form Fabrication Process. *Proc Solid Freef Fab Symp* 2007, 1

Anexo 4: Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts

Artículo en *Procedia CIRP Volume 94, 2020, Pages 425-429.*

Autores: I. Garmendia, J. Flores, M. Madarieta, A. Lamikiz, L. Uriarte, C. Soriano.

DOI: [10.1016/j.procir.2020.09.158](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.158).

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EL
PROCESO DE APORTE METÁLICO POR LÁSER BASADO EN LA
DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA GEOMETRÍA

11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7-10, 2020

Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts

Iker Garmendia^{a*}, Jon Flores^a, Mikel Madarieta^a, Aitzol Lamikiz^b, Luis Gerardo Uriarte^a,

Carlos Soriano^a

^aTEKNIKER, Iñaki Goenaga 5, Eibar 20600, Spain

^bUniversity of the Basque Country, ETSII, Alameda de Urquijo s/n, Bilbao 48013, Spain

* Corresponding author. Tel.: +34-943-206-744 ; fax: +34-943-202-744. E-mail address: iker.garmendia@tekniker.es

Abstract

Directed Energy Deposition (DED) processes are known for producing parts close to their final shape where only a post-process finish machining is required. However, geometrical deviations due to thermal effects may occur during the process, which results in the final geometry not being achieved or in the necessity of oversizing the part in order to compensate the distortion in the subsequent machining. In this article, a 3D scanning methodology of the manufactured part will be used to measure the geometry at different stages of the Laser Metal Deposition (LMD) process. In this way it is possible to assist the manufacturing as well as to make a comparison with the theoretical geometry during the process. This results in a higher probability of manufacturing the part without process failures and obtaining a precise reproduction of the geometry to be manufactured, reducing the subsequent post-processing operations and saving manufacturing time and cost.

© 2020 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Peer-review under responsibility of the Bayerisches Laserzentrum GmbH

Keywords: Laser Metal Deposition; Additive Manufacturing, Directed Energy Deposition, control, 3D scanner

1. Introduction

Additive Manufacturing (AM) methods based on Directed Energy Deposition (DED) offer the opportunity to generate medium to large sized and moderately complex parts in a near net shape way, i.e. close to the geometry of the final part. This makes them an alternative to conventional manufacturing methods with great flexibility and high savings in waste material [1,2].

However, the precision with which the parts are achieved together with the surface finish obtained after the process means that in most cases a subsequent machining finishing operation is required. In addition, due to the high heat input on the part, it is usual to have geometrical deviations on the component due to the induced residual stresses that may require rejects in manufacturing or an oversizing of the part. On the

other hand, there is often irregular growth in the different areas of the part due to thermal effects, part geometry or deposition patterns. For this reason there is an increasing interest in dimensionally controlling the part while it is being manufactured [3].

In [4] Stravroulakis et al. reviewed current metrological methods and studied their possible incorporation into AM processes. From their point of view, new sensors with software and hardware improvements could appear in the future, with a higher precision and measurement range than the current ones and that would allow working under process conditions.

In some cases, geometrical analyses have been carried out by digitizing the parts after their manufacture. In [5] Möller and Emmelmann conducted a study of the deviations of the manufactured part from the original CAD by relating them to the residual stresses resulting from the process. Turichin et al.

employed a similar procedure in the manufacture of a large cylinder, again analysing distortions due to residual stresses [6]. In these cases, the distortions were measured after the process once the part had cooled down. Nevertheless, it is possible that under certain conditions the geometrical deviations are such that a process failure occurs, so a measurement would be necessary during the manufacturing process.

Some works have aimed at making measurements during the deposition process by projecting laser light on the beads already deposited and processing the image obtained by a vision camera [7,8]. These systems are focused on providing closed-loop control over the process, although they present challenges such as the directionality of the measurement and the difficulty of making precise measurements on the area close to the melt pool. On the other hand, there are some works in which measurements of the part were made in intermediate stages of manufacture, either with the use of line scanners [9] or scanners based on structured light projection [10–12].

Moreover, the exposed works perform measurements only on the last deposited layer or on the complete part once manufacturing has been completed and the component moved from the manufacturing system to the measurement environment, so developments are still needed to incorporate these dimensional measurements in-process.

This work presents a methodology that allows the incorporation of the digitalization of the piece in the DED AM system, establishing a quality control as an intermediate stage of the manufacture, and can provide an auxiliary tool for the process trajectory generation.

2. Experimental set-up

The LMD cell in Fig. 1 was used for the development of this work. A 4kW IPG YLS4000 processing laser an ABB IRB4400 robot with an IRBP 250A positioner were used. Ti6Al4V wire of 0.8 mm diameter was deposited by means of a DINSE wire feeder and the COAXwire deposition head developed by Fraunhofer IWS [13].

The structured light based GOCATOR 3109 3D scanner was used to scan the manufactured part. The scanner has a near field of view of 67x86 mm and a far field of view of 93x88 mm, with a measurement range of 70 mm. As the part to be scanned was larger than the scanning volume, multiple scans from different robot poses were necessary to acquire the complete surface. The source of the projected light consists of blue LED emitted at a wavelength around 460 nm. The measurement accuracy is of +/- 50µm.

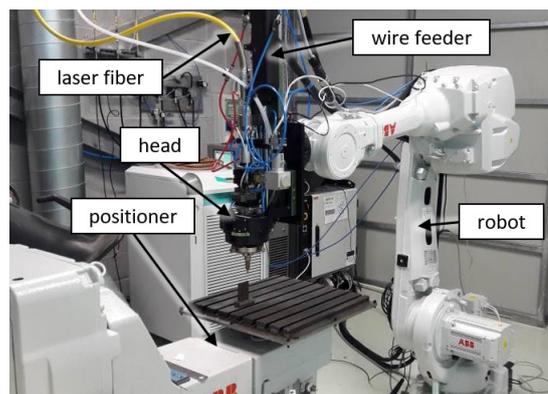


Fig. 1. Laser Metal Deposition robotic cell consisting of an industrial robot and a two-axis positioner.

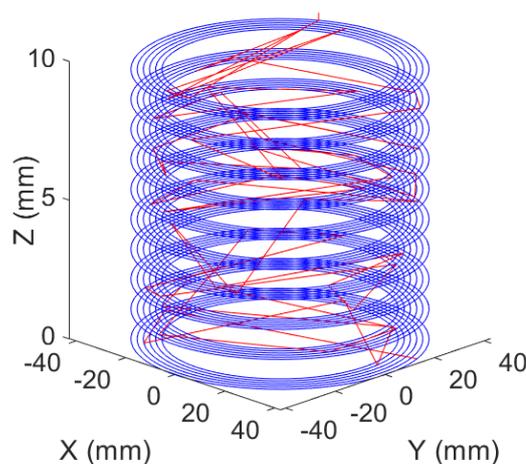


Fig. 2. Robotic trajectories with deposition (blue) and air (red) movements.

3. Methodology

3.1. DED robotic trajectory generation

The manufactured part consisted of a solid cylinder composed of coaxial circles with a distance between layers of 1.08 mm (Fig. 2). The separation between the cylinders was set at 1.76 mm corresponding to a 40% overlap. In order to avoid the possible appearance of defects at the union between the end and the beginning of each circle, both the starting point and the direction of rotation were set randomly. Also, the direction in which the cylinders were deposited was alternated from inside to outside and from outside to inside.

In this case, the rotation of the vertical axis of the positioner was used to reproduce the circular movements. Since the robot's working coordinate system, referred to as Work Object Coordinate System (CS_{WO}) moves together with the positioner, it is necessary to introduce a rotation in the head opposite to the rotation of the positioner. In this way, the head is kept with a constant orientation while the positioner rotates. On the other hand, the rotation of the positioner has angular limits ranging from -720° to 720° , which makes it impossible to deposit all the cylinders continuously. For this reason, after each cylinder has been deposited, the rotation of the positioner is restored.

3.2. Hand-eye calibration

The purpose of a hand-eye calibration is to obtain the coordinates of a scan, which by default are referenced to a scanner's coordinate system, CS_{scan} , referenced to the robot's CS_{WO} ,

$$\{p\}^{WO} = [T]_{scan}^{WO} \{p\}^{scan} \quad (1)$$

where:

- $\{p\}^{WO}$ are the coordinates of a scanned point referenced in the CS_{WO} .
- $\{p\}^{scan}$ are the coordinates of a scanned point referenced in the CS_{scan} .
- $[T]_{scan}^{WO}$ is the transformation matrix from CS_{scan} to CS_{WO} .

In order to obtain $[T]_{scan}^{WO}$ a new coordinate system is introduced, the Tool Center Point, TCP, of the robot, CS_{TCP} . Typically, this coordinate system refers to the tool tip or laser spot during AM, but in the case of the calibration, any coordinate system fixed in the deposition head can be used. Thus, $[T]_{scan}^{WO}$ is divided into two new transformation matrices,

$$\{p\}^{WO} = [T]_{TCP}^{WO} [T]_{scan}^{TCP} \{p\}^{scan} \quad (2)$$

where:

- $[T]_{TCP}^{WO}$ is the transformation matrix from CS_{TCP} to CS_{WO} , which is obtained as the pose of the robot on each scan.
- $[T]_{scan}^{TCP}$ is the transformation matrix from CS_{scan} to CS_{TCP} , and corresponds to the fixed relation between the scanner and the TCP of the robot, which is obtained by the hand-eye calibration.

To solve the calibration, a variant of equation (2) is used, which instead of working with the coordinates of a scanned point, $\{p\}^{scan}$, takes the position and orientation of the coordinate system of a calibration object, $[T]_{obj}^{scan}$:

$$[T]_{scan}^{TCP} = [T]_{TCP}^{WO} [T]_{obj}^{WO} [T]_{scan}^{obj} \quad (3)$$

An illustration of the coordinate systems involved in the calibration is shown in Fig. 3a. In this case, the Tsai-Lenz hand-eye calibration method was chosen to solve the calibration [14]. The procedure was set up by fixing the scanner on the deposition head. This method solves two transformation matrices at the same time, $[T]_{obj}^{WO}$ and $[T]_{scan}^{TCP}$, so as $[T]_{scan}^{TCP}$ is known for each robot pose, it is only necessary to solve $[T]_{scan}^{obj}$. Scans from various positions are necessary to resolve the system and reduce the calibration error, while the placement of the calibration object is indifferent. In this case, 10 different robot poses were used for the calibration.

$[T]_{scan}^{obj}$ was obtained in this case by scanning a four-sphere pattern made of plastic using Fused Deposition Modeling (FDM) AM technology. The spheres were detected by means of sphere fitting, and knowing the coordinates of their centres with respect to the scanner and to the coordinate system of the object, the transformation was obtained (Fig. 3b).

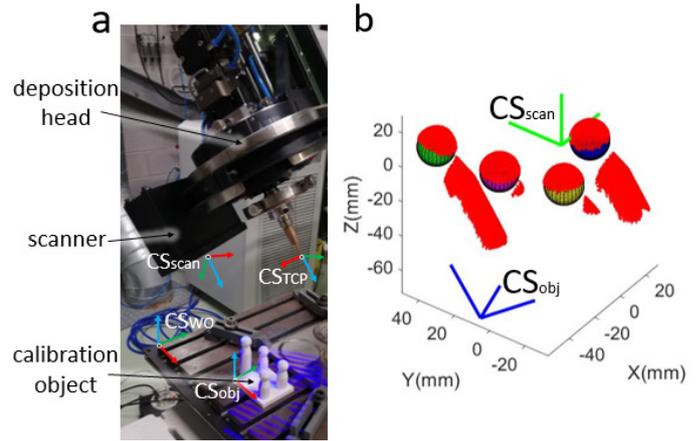


Fig. 3. (a) Representation of the coordinate systems involved in the hand-eye calibration; (b) Sphere fitting performed to obtain the calibration object to scanner transformation.

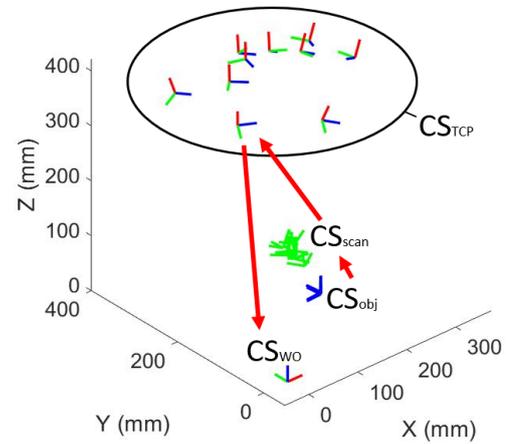


Fig. 4. Validation of the calibration output, showing the coordinate systems obtained from the different robot poses. As a result of the hand-eye calibration, CS_{obj} matches for all scanning poses.

Finally, equation (3) is computed and $[T]_{scan}^{TCP}$ is obtained, i.e. the position and orientation of the scanner relative the TCP of the robot. Fig. 4 shows the validation of the calibration where CS_{obj} is overlaid for the different robot poses used in the calibration. Red arrows indicate the transformations needed to obtain the transformation from CS_{obj} to CS_{WO} , or in other words, the path used to reference a acquired point in the scanner's coordinate system, $\{p\}^{scan}$, to the robot's coordinate system, $\{p\}^{WO}$.

3.3. Laser Metal Deposition

The part in Fig. 5 was manufactured with a laser power of 1800 W, a robot speed of 25 mm/s and a wire insertion speed of 5 m/min resulting in a feed rate of 0.667 kg/h. Argon was used as protective gas through the deposition nozzle. In this case work was done with the laser defocused at 0.5 mm above the focus.

The result was a part with an outer diameter of 85 mm and an inner diameter of 63.5 mm with a height of 49.6 mm.

To avoid surface oxidation of the part in the future, a robotic bag with a protective atmosphere should be integrated, capable

of working with the coordinated movement between the robot and the positioner.

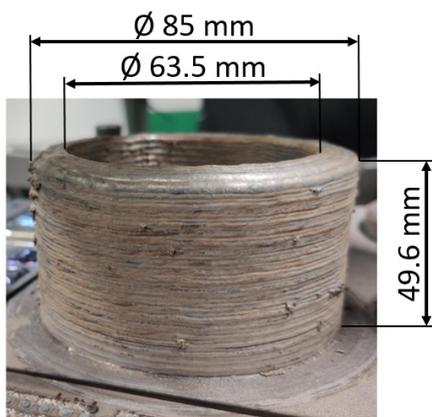


Fig. 5. Cylindrical Ti6Al4V part manufactured by wire Laser Metal Deposition.

4. Results

After the hand-eye calibration and manufacturing of the part, a scanning from different locations was conducted. Fig. 6 shows one of the positions in which the side wall of the manufactured cylinder was scanned. The positioner was again employed to rotate the part and achieve relative positioning between scanner and part. As a result of the calibration, the coordinates obtained from the different points of view were referenced to the coordinate system of the manufacturing system, so no further translation or orientation transformations were required.

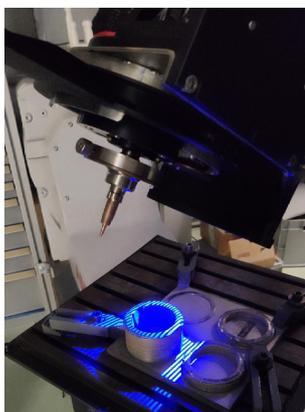


Fig. 6. Scanning of the manufactured cylinder from one of the robot poses.

However, the point clouds obtained were filtered and downsampled to reduce their size and facilitate their handling. Fig. 7 shows the result after the stitching of the different point clouds acquired. The colour scales represent the height reached in the piece with respect to the base of the manufacture (top) and to the mean height of the last deposited layer (bottom). This information can be especially useful to determine if the growth of the part is being adequate, allowing to implement corrections on the robot position in order to maintain an optimal distance between deposition nozzle and part.

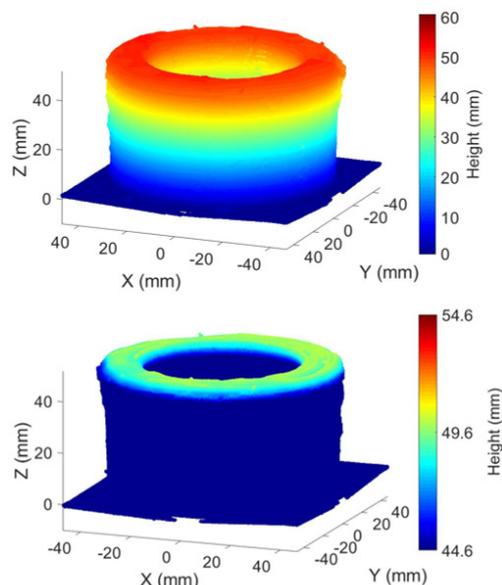


Fig. 7. Point cloud obtained after stitching the scans obtained from different positions, indicating the height obtained in the deposition.

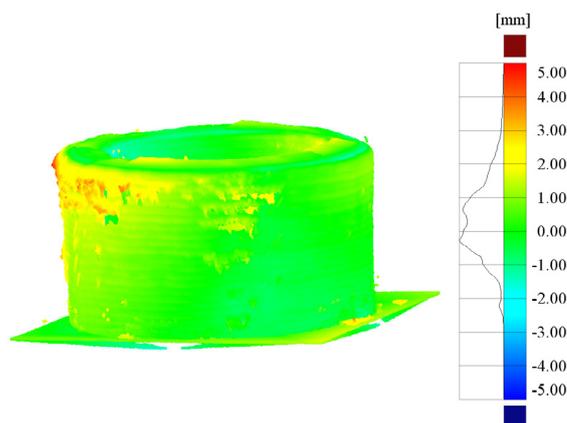


Fig. 8. Comparison of the scan of the manufactured part against the CAD model showing the geometrical differences.

Finally, in Fig. 8 a comparison against the CAD model of the manufactured part is presented. The geometrical deviations due to the process can therefore be examined.

5. Conclusion

This study has introduced a methodology for the integration of a three-dimensional measurement system into an AM system based on DED technologies. Compared to other part digitizing methods, which only obtain information from the last layer or bead deposited, the developed approach allows to obtain a complete reconstruction of the manufactured geometry in the coordinates of the manufacturing machine or robot and in an efficient and automatable way.

As a result, in-process dimensional quality control of the part can be performed, without the need to conclude production and dismount the part to an external 3D measurement environment. This allows an early control of geometric distortions through comparison against the CAD of the component to be manufactured. On the other hand, the

development can be employed to digitalize component surfaces and generate robot or machine trajectories without the need of a CAD model, enabling its implementation in cutting, deburring, cladding or AM applications.

Future challenges include the construction of a more accurate calibration object and the verification of the uncertainty of the calibration method as a result of errors induced by the scanning, calibration methodology and robot movement.

In addition, their suitability for DED processes, and in particular the LMD, will be investigated by incorporating intermediate scans in the manufacture of geometrically complex components. The effect of the part shrinkage due to cooling and geometrical distortion due to thermal stresses will be further studied.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the financial support given by ASSALA project under H2020-EU.3.4.5 CLEANSKY2 programme (Grant agreement ID: 831857), and by the Basque Government through the ADDISEND and LASPRINT projects part of the Elkartek 2018 and Hazitek 2018 programmes.

References

- [1] Thomas, D.; Gilbert, S. Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. In Proceedings of the NIST Special Publication; 2014; Vol. 1176, pp. 1–77.
- [2] Allen, J. An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts. In Proceedings of the Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing.; 2006; pp. 17-1-17–10.
- [3] Mani, M.; Lane, B.M.; Donmez, M.A.; Feng, S.C.; Moylan, S.P. Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes; 2016.
- [4] Stavroulakis, P.I.; Leach, R.K. Stavroulakis, P. I. and Leach, Richard K. (2016) Review of post-process optical form metrology for industrial-grade metal additive manufactured parts. Review of. 2016, 87, <https://doi.org/10.1063/1.4944983>.
- [5] Möller, M.; Emmelmann, C. Quality target-based control of geometrical accuracy and residual stresses in laser metal deposition. J. Laser Appl. 2018, 30, 32303, <https://doi.org/10.2351/1.5040623>.
- [6] Turichin, G.; Zemlyakov, E.; Babkin, K.; Ivanov, S.; Vildanov, A. Analysis of distortion during laser metal deposition of large parts. Procedia CIRP 2018, 74, 154–157, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.068>.
- [7] Davis, T.A.; Shin, Y.C. Vision-based clad height measurement. Mach. Vis. Appl. 2011, 22, 129–136, <https://doi.org/10.1007/s00138-009-0240-9>.
- [8] Heralić, A.; Christiansson, A.K.; Ottosson, M.; Lennartson, B. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. Opt. Lasers Eng. 2010, 48, 478–485, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.012>.
- [9] Heralić, A.; Christiansson, A.-K.; Lennartson, B. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. Opt. Lasers Eng. 2012, 50, 1230–1241, <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.03.016>.
- [10] Buhr, M.; Weber, J.; Wenzl, J.-P.; Möller, M.; Emmelmann, C. Influences of process conditions on stability of sensor controlled robot-based laser metal deposition. Procedia CIRP 2018, 74, 149–153, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.067>.
- [11] Garmendia, I.; Pujana, J.; Lamikiz, A.; Flores, J.; Madarieta, M. Development of an Intra-Layer Adaptive Toolpath Generation Control Procedure in the Laser Metal Wire Deposition Process. Materials (Basel). 2019, 12, 352, <https://doi.org/10.3390/ma12030352>.
- [12] Garmendia, I.; Pujana, J.; Lamikiz, A.; Madarieta, M.; Leunda, J. Structured light-based height control for laser metal deposition. J. Manuf. Process. 2019, 42, 20–27, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.018>.
- [13] Ocylok, S.; Lechnitz, M.; Thieme, S.; Ocylok, S. Investigations on laser metal deposition of stainless steel 316L with coaxial wire feeding. In Proceedings of the 9th International Conference on Photonic Technologies LANE 2016; 2016; pp. 1–4.
- [14] Tsai, R.Y. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 1986; pp. 364–374.

