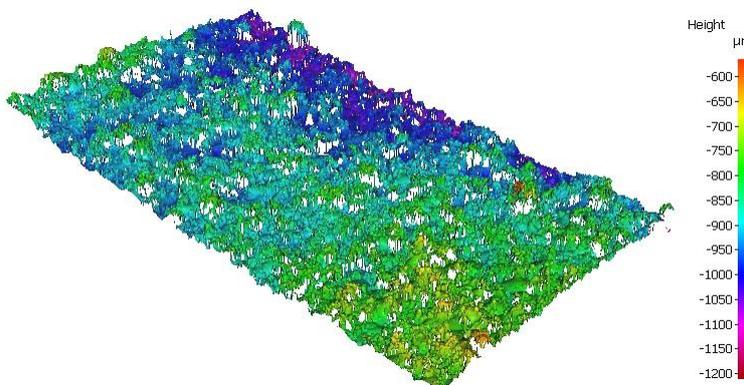


MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE DOWNSKIN Y SUPPORT-FREE STRUCTURES EN EL PROCESO DE LASER POWDER BED FUSION (LPBF)



Estudiante: García Antoranz, Marta

Director: Lamikiz Mentxaka, Aitzol

Curso: 2023-2024

Fecha: Bilbao, 05 de junio de 2024

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Resumen

La fusión por lecho de polvo (PBF, por sus siglas en inglés, Powder Bed Fusion) y en concreto la fusión selectiva por láser (LPBF, Laser Powder Bed Fusion) es un método de fabricación aditiva que se emplea con algunos metales y que permite obtener piezas con geometrías muy complejas. Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta este método es el post-procesado que hay que realizar tanto para mejorar la calidad superficial (rugosidad) como para asegurar unas buenas propiedades metálicas (porosidad, resistencia mecánica...). En concreto, uno de los problemas que más afecta a la calidad obtenida directamente de estas piezas es la adhesión de polvo metálico en las zonas inferiores de la pieza (downskin). Estas regiones se encuentran en contacto directo con polvo metálico que no se debe fusionar pero que termina adhiriéndose a la pieza debido al calor del láser de capas superiores. A lo largo de este trabajo, se pretende mejorar la calidad de las superficies de downskin mediante la modificación de parámetros que intervienen en el proceso.

Palabras clave: Fabricación aditiva, FA, fusión láser por lecho de polvo, LPBF, downskin, calidad superficial, rugosidad, Renishaw, QuantAM, Dyndrite.

Laburpena

Hauts-ohantze bidezko fusioa (PBF, ingelesezko siglengatik, Powder Bed Fusion), eta zehazki laser bidezko fusio selektiboa (LPBF, Laser Powder Bed Fusion), metal batzuekin erabiltzen den fabrikazio gehigarriko metodo bat da, geometria oso konplexuak dituzten piezak lortzea ahalbidetzen duena. Metodo honek aurre egin beharreko arazo handienetako bat post-prozesatua da, bai gainazal-kalitatea hobetzeko (zimurtasuna), bai propietate metaliko onak ziurtatzeko (porositatea, erresistentzia mekanikoa...). Zehazki, pieza horietatik zuzenean lortutako kalitateari gehien eragiten dion arazoetako bat piezaren beheko aldeetan hauts metalikoa itsastea da (downskin). Eskualde horiek kontaktu zuzena dute fusionatu behar ez den hauts metalikoarekin, baina piezari itsasten zaio goiko geruzetako laserraren beroaren ondorioz. Lan honetan, downskin-eko gainazalen kalitatea hobetu nahi da, prozesuan parte hartzen duten parametroak aldatuz.

Gako-hitzak: Gehikuntzako fabrikazioa, hauts-ohantze bidezko laser-fusioa, LPBF, downskin, gainazal-kalitatea, zimurtasuna, Renishaw, QuantAM, Dyndrite.

Abstract

Powder Bed Fusion (PBF) and specifically Laser Powder Bed Fusion (LPBF) is an additive manufacturing method used with some metals that enables to obtain parts with very complex geometries. One of the major problems faced by this method is the post-processing that must be carried out both to improve surface quality (roughness) and to ensure good metallic properties (porosity, mechanical strength...). In particular, one of the problems that most affects the quality obtained directly from these parts is the adhesion of metal powder in the lower areas of the part (downskin). These regions are in direct contact with metal powder that should not be fused but ends up adhering to the part due to the heat of the laser of upper layers. Throughout this work, it is intended to improve the quality of the downskin surfaces by modifying the parameters involved in the process.

Keywords: Additive manufacturing, AM, laser powder bed fusion, LPBF, downskin, surface quality, roughness, Renishaw, QuantAM, Dyndrit

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Índice

1	Introducción	1
1.1	Fabricación Aditiva	1
1.2	Fusión por lecho de polvo (PBF).....	1
2	Contexto	3
3	Objetivos y alcance del trabajo	5
4	Beneficios que aporta el trabajo	7
4.1	Beneficios técnicos.....	7
4.2	Beneficios económicos.....	7
4.3	Beneficios medioambientales	8
5	Marco teórico.....	9
5.1	Fusión láser por lecho de polvo (LPBF)	9
5.1.1	Diseño del modelo 3D	9
5.1.2	Proceso de fabricación	9
5.1.3	Post - tratamientos del proceso de LPBF	11
5.2	Defectos en las superficies <i>Downskin</i>	12
5.3	Parámetros de proceso de LPBF	13
5.3.1	Espesor de la capa de polvo	14
5.3.2	Modo de trabajo del haz láser: pulsado y continuo.....	14
5.3.3	Parámetros de escaneo del láser	15
5.3.4	Zonas de barrido.....	17
5.3.5	Principio de variación de parámetros de downskin	21
6	Estado del arte	23
7	Análisis de alternativas.....	31
7.1	Softwares de preparación del proceso	31
7.2	Sistema de distribución de polvo y tipo de polvo	31
7.3	Parámetros de fabricación	31
8	Selección de la solución propuesta	32
9	Análisis de riesgos	33
10	Planificación de la investigación.....	35
10.1	Fases del proyecto	35
10.1.1	Fase 1. Estudio del proceso de LPBF y revisión de documentación	35
10.1.2	Fase 2. Fabricación de piezas y análisis de resultados	35

10.1.3	Fase 3. Estudio y diseño de un proceso de fabricación con Dyndrite	36
10.1.4	Fase 4. Documentación y presentación TFM	36
10.2	Diagrama de Gantt	37
11	Desarrollo experimental.....	39
11.1	Experimento 1: Arco circular.....	39
11.1.1	Análisis de resultados (experimento 1).....	41
11.2	Experimento 2: Arco circular y menor VED.....	44
11.2.1	Análisis de resultados (experimento 2).....	45
11.3	Experimento 3: Semiesfera y cilindro con aletas	48
11.3.1	Análisis de resultados (experimento 3).....	50
11.4	Experimento 4: Bloque con paredes inclinadas	58
11.4.1	Análisis de resultados (experimento 4).....	62
11.4.2	Problemas encontrados en el experimento 4	72
11.5	División de la pieza en regiones con el software de Dyndrite	73
12	Aspectos económicos.....	82
12.1	Presupuesto	82
12.1.1	Personal.....	82
12.1.2	Material	82
12.2	Presupuesto total.....	83
13	Conclusiones y futuras líneas de investigación	84
13.1	Conclusiones	84
13.2	Futuras líneas de investigación	85
14	Bibliografía	86

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de la potencia, velocidad de barrido, distancia de hatching, densidad volumétrica y densidad lineal de energía del experimento de Calignano et al. [35]	28
Tabla 2. Tabla de la potencia del láser, velocidad de escaneo y número de capas del experimento de Khan et al. [36].....	29
Tabla 3. Riesgos del proyecto	34
Tabla 4. Parámetros del experimento 1	40
Tabla 5. Parámetros del experimento 2	44
Tabla 6. Tabla resumen de los parámetros de cuatro muestras de los experimentos 1 y 2.....	47
Tabla 7. Parámetros del experimento 3	49
Tabla 8. Parámetros de fabricación del experimento 4	59
Tabla 9. Valor medio de la anchura de las aletas (mm) del experimento 4.....	64
Tabla 10. Valores de rugosidad de las muestras 1P-18P	70
Tabla 11. Valores de rugosidad de las muestras OP - 19P	71
Tabla 12. Presupuesto personal	82
Tabla 13. Presupuesto de la materia prima.....	82
Tabla 14. Presupuesto de la maquinaria	82
Tabla 15. Presupuesto del equipo informático	83
Tabla 16. Presupuesto total del proyecto	83

Índice de figuras

Figura 1. Logos del CFAA, UPV/EHU, A.I.E, Gobierno Vasco, Diputación Foral de Bizkaia, Parke	3
Figura 2. Ejemplo de alta rugosidad en las superficies de downskin de unas piezas.....	4
Figura 3. ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura y ODS 12: Producción y Consumo Responsables [11]	8
Figura 4. Modelo 3D de una pieza realizado con Solid Edge y renderizado con Keyshot	9
Figura 5. Dibujo esquemático del proceso de PBF [12].....	10
Figura 6. Tipos de estructuras de soporte: bloque (a), forma de árbol (b), polilínea (c), barra (d) [15].....	11
Figura 7. Zona de Upskin y Downskin de una pieza con paredes inclinadas.....	12
Figura 8. Dibujo de la zona sobrecalentada sobre el polvo suelto y (b) Formación de escoria resultante en la parte final [23]	13
Figura 9. Representación en un modelo 3D del espesor de capa	14
Figura 10. Diagramas esquemáticos que muestran la superposición de las trayectorias en los modos de onda continua (a) y onda pulsada (b) [26]	15
Figura 11. Diagrama esquemático de la densidad de energía Gaussiana del láser [26]	15
Figura 12. Dibujo esquemático de la distancia entre puntos del haz láser	15
Figura 13. Dibujo esquemático de la distancia entre las trayectorias del láser	16
Figura 14. Dibujo esquemático de los puntos del haz del láser para dos distancias de trayectoria diferentes (hd1 y hd2).....	16
Figura 15. Esquema de los parámetros de proceso de <i>upskin</i> y <i>downskin</i> [27].....	17
Figura 16. Dibujo esquemático de las partes de cada capa a nivel de sección	18
Figura 17. Dibujo esquemático de los bordes, el perímetro de la sección real y un punto del haz láser	18
Figura 18. Dibujo esquemático de los contornos de barrido (en verde).....	19
Figura 19. Dibujo esquemático de los parámetros de Fill Hatch.....	19
Figura 20. Fill Hatch: Meander, Stripes, Chessboard y Total fill.....	20
Figura 21. Rotación del Fill Hatch	21
Figura 22. Esquema del problema de downskin del calor transmitido al polvo metálico	21
Figura 23. Esquema de la solución al problema de downskin para evitar que la energía del láser alcance al polvo metálico	22
Figura 24. Distribución del polvo con cuchilla para diferentes espesores de capa [31]	23
Figura 25. Morfología de la superficie de muestras fabricadas con diferentes espesores de capa de polvo [32]	24
Figura 26. Historial térmico de dos estrategias de escaneo diferentes con diferentes longitudes de vector [33]	25
Figura 27. Gráfica mostrando la relación entre Ra de las superficies de downskin y VED [34]	26

Figura 28. Gráfica mostrando la relación entre Ra de las superficies de downskin y la potencia pico (a) y la relación entre Ra de las superficies de downskin y la velocidad de escaneo (b) [34].....	27
Figura 29. Interfaz entre las estructuras de soporte y la cara inferior de la pieza (a) y estructura de soporte de tipo bloque (b) [35].....	29
Figura 30. Imágenes SEM de las muestras de la tabla: 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e), 6 (f), 7 (g) [36].....	30
Figura 31. Diagrama de Gantt.....	38
Figura 32. Geometría de la pieza con forma de arco del experimento 1.....	39
Figura 33. Muestras colocadas sobre la mesa de impresión (experimento 1).....	41
Figura 34. Imagen detalle de los soportes en los arcos (experimento 1).....	41
Figura 35. Muestras vistas desde arriba (experimento 1).....	42
Figura 36. Regiones de downskin de las muestras del experimento 1.....	42
Figura 37. Imagen detalle de las muestras 7, 8, 15 y 16 vistas desde abajo (experimento 1).....	43
Figura 38. Muestras vistas desde arriba (experimento 2).....	45
Figura 39. Regiones de downskin de las muestras del experimento 2.....	45
Figura 40. Imagen detalle de las muestras 7, 8, 15 y 16 vistas desde abajo (experimento 2).....	46
Figura 41. Cuatro muestras con cuadro densidades volumétricas de energía (misma potencia, distinta distancia entre puntos).....	47
Figura 42. Defecto de unión de cuatro muestras con cuatro densidades volumétricas de energía (misma potencia).....	48
Figura 43. Modelo 3D de las dos piezas del experimento 3: semiesfera (a), cilindro con aletas (b).....	48
Figura 44. Muestras colocadas sobre la mesa de impresión (experimento 3).....	49
Figura 45. Muestras vistas desde arriba (experimento 3).....	50
Figura 46. Muestra 3P con la región de downskin marcada con una circunferencia.....	50
Figura 47. Regiones de downskin de las muestras semiesféricas del experimento 3.....	51
Figura 48. Imagen detalle de las cuatro muestras semiesféricas con modo de haz láser pulsado.....	52
Figura 49. Imágenes bajo microscopio de la muestra 4C del experimento 3.....	53
Figura 50. Imágenes bajo microscopio de la muestra 4P del experimento 3.....	54
Figura 51. Perfil de rugosidades de las muestras 4C y 4P del experimento 3.....	55
Figura 52. Piezas cilíndricas del experimento 3 vistas de perfil al finalizar la fabricación y una vez extraídas de la plataforma y separados los soportes.....	56
Figura 53. Vista detalle de las aletas superiores de la muestra 5P (experimento 3).....	56
Figura 54. Piezas cilíndricas del experimento 3 vistas desde abajo al final la fabricación una vez extraídas de la plataforma y separados los soportes.....	57
Figura 55. Geometría de la pieza con paredes inclinadas del experimento 4.....	58
Figura 56. Zonas de las regiones de downskin.....	58
Figura 57. Disposición de las muestras sobre la plataforma de fabricación en el software de QuantAM.....	61

Figura 58. Imagen detalle de las piezas 4P y 6P con los soportes sobre la plataforma de fabricación	61
Figura 59. Muestras del experimento 4 sobre la plataforma de fabricación	62
Figura 60. Comparación visual entre las piezas reales y el diseño CAD	62
Figura 61. Ancho teórico de las paredes inclinadas de las piezas del experimento 4.....	63
Figura 62. Parejas de ángulos correspondiente a cada aleta	63
Figura 63. Muestra del experimento 4 vista desde arriba con las parejas de ángulos indicadas	64
Figura 64. Gráfico del ancho de las paredes (mm) de las piezas del experimento 4	65
Figura 65. Muestras del experimento 4 vistas desde abajo	66
Figura 66. Vista detalle de la zona de downskin de las piezas 1P-6P, ángulos 10°, 20°, 30°, 40° (experimento 4).....	67
Figura 67. Vista detalle de la zona de downskin de las piezas 7P-12P, ángulos 10°, 20°, 30°, 40° (experimento 4).....	67
Figura 68. Vista detalle de la zona de downskin de las piezas 13P-18P, ángulos 10°, 20°, 30°, 40° (experimento 4).....	68
Figura 69. Colocación de la pieza en el soporte para medir (experimento 4).....	68
Figura 70. Colocación de la pieza y el soporte durante una medición (experimento 4).....	69
Figura 71. Vista 3D de la rugosidad de la muestra 3P sin haber aplicado un filtro.....	69
Figura 72. Plano de la rugosidad antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el filtro para corregir la inclinación.....	70
Figura 73. Gráfica de la rugosidad de las muestras 1P - 18P.....	70
Figura 74. Gráfica de la rugosidad de las muestras 0P - 19P.....	71
Figura 75. Problema de la geometría del experimento 4.....	72
Figura 76. Nueva geometría propuesta de la pieza del experimento 4	72
Figura 77. Pieza posicionada sobre la plataforma de fabricación en Dyndrite	73
Figura 78. Primer fragmento del programa de Python: abrir el programa e importar la pieza	74
Figura 79. Segundo fragmento del programa de Python: contorno y hatches	75
Figura 80. Tercer fragmento del programa de Python: inicializar la zona tipo DOWNSKIN	75
Figura 81. Cuarto fragmento del programa de Python: crear los estilos de fabricación	76
Figura 82. Quinto fragmento: asignar los estilos de fabricación a cada segmento y segmentar la pieza	77
Figura 83. Segmentación de la pieza en el programa de Dyndrite.....	78
Figura 84. Vista detalle de la segmentación de la pieza.....	78
Figura 85. Trayectorias en el software de QuantAM	79
Figura 86. Vista detalle de las trayectorias en el software de QuantAM.....	80
Figura 87. Estilos de fabricación en el programa de QuantAM.....	81

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

1 Introducción

1.1 Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva es un proceso que consiste en la producción de objetos a partir de la superposición de capas sucesivas de material. A diferencia de la fabricación subtractiva, en la que se parte de un bloque de material en el que se “talla” la pieza final, y en la que se puede generar una gran cantidad de sobrante, en la fabricación aditiva se puede reducir el material de partida necesario, así como el excedente generado [01]. Además de esto, también deja de ser necesario el uso de diferentes herramientas para la fabricación de diferentes geometrías y componentes ya que todo se produce con los mismos utillajes.

Otro de los puntos clave de la fabricación aditiva es la posibilidad de obtener geometrías muy complejas que, empleando otros métodos de fabricación, podría resultar muy costoso o incluso imposible. Además, a través de esta técnica se pueden fabricar componentes con cavidades internas que de otra manera no se podrían mecanizar [02].

Si bien la impresión 3D en materiales plásticos ha ganado mucha popularidad en los últimos años [03], llegando incluso a ser usada por particulares en sus propias casas, la fabricación aditiva con metales también está abriéndose paso en muchos sectores. En el sector sanitario se puede emplear por ejemplo en odontología o para la fabricación de prótesis [04]. En el sector aeronáutico y aeroespacial la fabricación aditiva puede traer muchas ventajas frente a otras formas de producción, ya que en este sector se pueden necesitar piezas con geometrías muy complicadas. Además, un menor peso de los componentes puede ser también clave en la reducción en el consumo de combustible y otros recursos, y esto se podría conseguir con piezas no macizas o a través de cavidades internas que no comprometan la resistencia estructural de los elementos [05]. En la siguiente sección se presenta una breve introducción de la tecnología de fusión por lecho de polvo.

1.2 Fusión por lecho de polvo (PBF)

En la fabricación aditiva en metales, una de las tecnologías más extendidas es la fusión por lecho de polvo (PBF, por sus siglas en inglés: *Powder Bed Fusion*). Este método de fabricación comienza con la deposición de una fina capa de polvo en una plataforma base, para luego fundir un área concreta e ir construyendo el componente capa a capa. Para la fusión del metal se pueden emplear diferentes tecnologías, entre las que destacan la fusión por láser y la fusión por haz de electrones. De esta manera se pueden distinguir dos métodos principales de fabricación de PBF: la fusión por haz de electrones (EBM, *Electron Beam Melting*) y la fusión láser por lecho de polvo (LPBF, *Laser Powder Bed Fusion*) [06].

Este proyecto se centra en la Fusión Láser por Lecho de Polvo. Esta tecnología rompe con muchas de las limitaciones con las que se habían encontrado las técnicas de mecanizado tradicionales, tanto por las geometrías que se pueden obtener, como por el número de herramientas necesarias para fabricar una pieza compleja. No obstante, es un método que puede presentar algunos defectos que conviene evitar para asegurar un buen desempeño y una buena calidad superficial de los componentes.

Unas de las zonas críticas de la pieza en este proceso son las superficies de esta que no tienen metal ya fundido y solidificado debajo, sino que se encuentran sobre el lecho de polvo metálico (conocidas como

downskin surfaces). Esto se debe a que el calor del láser de capas superiores puede alcanzar el polvo y adherir partículas que no deberían formar parte de la pieza [07]. Esta rugosidad afecta tanto a la calidad superficial del objeto, como a sus propiedades mecánicas. En zonas visibles se podría tratar de mejorar este aspecto con un post-tratamiento una vez finalizado el proceso. Sin embargo, esto no es posible en zonas de geometría compleja o en cavidades internas. Por ello, se está tratando de modificar y optimizar los parámetros del proceso en estas zonas críticas para así poder obtener un mejor resultado y reducir la cantidad de post-tratamientos necesarios.

2 Contexto

Este proyecto se desarrolla en el Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica de la Universidad del País Vasco (CFAA) en el ámbito de la fabricación aditiva en metales, y más concretamente en la tecnología de fusión láser por lecho de polvo (LPBF).

El CFAA es un centro tecnológico que permite que trabajen de forma conjunta la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), la Agrupación Empresarial para el Desarrollo de Técnicas de Fabricación Aeronáutica Avanzada (A.I.E), el Gobierno Vasco y la Diputación Foral de Bizkaia, y colaborando con el Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia. Su objetivo principal es desarrollar tecnologías avanzadas de fabricación de tal forma que este nuevo conocimiento se transfiera de forma clara y rápida a las empresas tecnológicas con las que colabora. Por ello, sirve de nexo entre el personal investigador (propio de la universidad o personal investigador externo), y las empresas del sector aeronáutico y estructural. Esta colaboración estrecha entre la universidad y el sector empresarial permite funcionar con un enfoque realista y dirigido a los procesos reales de producción, pero sin dejar de lado la investigación, el desarrollo y el uso de conocimiento nuevo e innovador en las tecnologías de fabricación avanzada.



Figura 1. Logos del CFAA, UPV/EHU, A.I.E, Gobierno Vasco, Diputación Foral de Bizkaia, Parke

La aeronáutica es la rama de la ingeniería que se dedica al estudio, diseño y fabricación de aparatos de vuelo. En esta disciplina entran en juego muchos factores como son la ciencia de fluidos para permitir la sustentación en el aire de dichos aparatos, el aerodinamismo para asegurar un vuelo con la menor oposición del aire posible, la ciencia de materiales para emplear aquellos que mejor se adapten a las geometrías deseadas asegurando una resistencia mecánica adecuada... Uno de los elementos clave en la aeronáutica es sin duda el peso de los componentes. Se busca reducir el peso de las aeronaves lo máximo posible, pero asegurando siempre un buen desempeño y resistencia de todos los componentes. Un peso alto significaría que se ha empleado un volumen grande de materiales, y por lo tanto se necesitaría también consumir más combustible durante el vuelo. De esta manera, es clave reducir el peso de los componentes todo lo posible para reducir el coste de los materiales y la cantidad de combustible necesario para el vuelo. Es aquí donde la fabricación aditiva se ha hecho un hueco en este sector en los últimos años.

La fabricación aditiva permite la creación de componentes con geometrías internas más complejas que no sean macizas, reduciendo así el peso de las aeronaves sin afectar a su resistencia. Este cambio en el diseño (tanto interno como externo) de los componentes reduce el consumo de materiales durante la fabricación, reduce el nivel de emisiones durante el vuelo al reducir el consumo de combustible y mejora la eficiencia del avión. Por otro lado, se pueden conseguir geometrías más complejas con cavidades internas que eran imposible de conseguir con las tecnologías de fabricación sustractiva tradicionales.

Una de las tecnologías más empleadas en el sector aeronáutico en la fabricación aditiva en metales es la fusión láser por lecho de polvo. Esta tecnología consiste en la fabricación de piezas metálicas capa por capa, hasta conseguir la pieza final. Para ello, sucesivamente se colocan capas de polvo metálico, en las que se funde la sección de la pieza correspondiente a cada capa. Según la plataforma va descendiendo y se va construyendo una capa sobre la anterior, se va fabricando la pieza hasta conseguir la geometría deseada. Este método permite fabricar todo tipo de piezas y todo tipo de geometrías, sin tener que emplear herramientas diferentes para cada tipo de pieza y con muchos menos límites en las geometrías que se pueden diseñar y fabricar. La calidad de las piezas LPBF depende mucho de los parámetros que intervienen en el proceso (como la potencia del láser, el espesor de cada capa, la velocidad de escaneo del láser...). Uno de los problemas más significativos de las piezas es la rugosidad que aparece en las superficies de downskin.

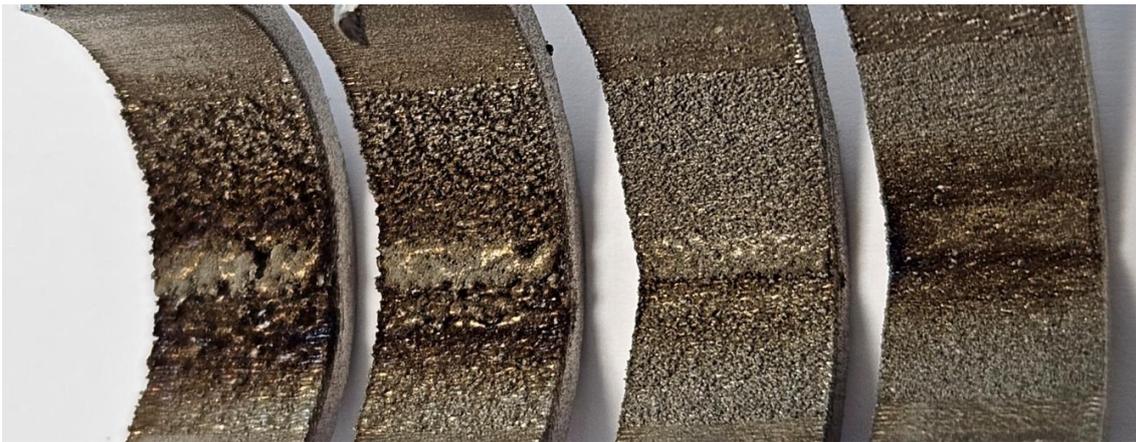


Figura 2. Ejemplo de alta rugosidad en las superficies de downskin de unas piezas

Las superficies de downskin son las partes de la pieza que “miran” hacia abajo y que se encuentran en contacto con el polvo metálico no fundido durante el proceso. En estas superficies, el calor del láser de las capas superiores es transferido al polvo, adhiriendo ciertas partículas de polvo y aumentando la rugosidad de estas zonas. Para mejorar la evacuación de calor procedente de la pieza, en ocasiones se colocan soportes que facilitan la transmisión del calor hacia la plataforma de fabricación, y reducen también la distorsión de la pieza debido a tensiones térmicas. Estos soportes también sostienen la pieza cuando se intentan fabricar geometrías con una gran inclinación, ya que resulta muy difícil fabricar piezas con ángulos de inclinación respecto a la horizontal muy pequeños.

Este trabajo se centra en el análisis de los parámetros más relevantes que intervienen en el problema de la rugosidad en las superficies de downskin, para modificarlos de tal forma que la calidad superficial al finalizar la fabricación sea la mejor posible. Las superficies de downskin que quedan a la vista pueden ser mecanizadas después de terminar el proceso de fabricación para mejorar su calidad superficial. Sin embargo, en las cavidades internas esto resulta imposible, por lo que la rugosidad obtenida en la fabricación aditiva se va a mantener en la pieza final. Por lo tanto, es muy importante ser capaces de reducir esta rugosidad al máximo durante el proceso de fabricación. Por otro lado, la rugosidad no tiene solo que ver con la calidad superficial de las piezas, sino que también interviene en las propiedades mecánicas. Una rugosidad muy alta podría derivar en un mal desempeño de los componentes. De esta manera, si se consigue reducir la rugosidad de las superficies de downskin, se reducirán también los procesos de rectificado y pulido posteriores, y se mejorará también la resistencia de las piezas. Esto es clave en el sector aeronáutico en el que se desea emplear esta tecnología ya que se necesitan componentes resistentes y fiables que funcionen correctamente durante el vuelo.

3 Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es la mejora de la calidad superficial en las zonas de *downskin* de las piezas obtenidas a través de la técnica de fusión láser por lecho de polvo. Para ello se pueden modificar los diferentes parámetros que intervienen en este proceso: orientación de la pieza a fabricar, espesor de capa de polvo, potencia del láser, tipo de barrido, tiempo de exposición del láser, separación entre las trayectorias del láser, número de bordes...

Los parámetros óptimos a emplear en el proceso varían dependiendo de cada pieza, e incluso difieren en distintas zonas de una misma pieza. Este trabajo se centra en la modificación de los parámetros más relevantes del proceso en las zonas de *downskin*, y en el análisis de la influencia que tienen en la rugosidad de dichas regiones. Para ello, se fabrican piezas de diferentes geometrías y con distintos ángulos de inclinación respecto a la horizontal, y se analiza y compara la rugosidad de sus zonas de *downskin*. Los parámetros se modifican dentro de unos límites, ya que hay que tener siempre en cuenta que se debe mejorar la calidad superficial, pero asegurando un tiempo de fabricación y un consumo de materia y energía razonables.

Los objetivos de este proyecto desglosados son los siguientes:

- Diseño de piezas con geometrías que permitan optimizar cada experimento de tal forma que se puedan tomar datos relevantes en cada pieza.
- Fabricación de piezas en un tiempo razonable y con calidades superficiales aceptables.
- Primer análisis visual de las piezas mediante microscopio para tener una idea general de la calidad de las superficies de la pieza.
- Medición y análisis de los valores de rugosidad obtenidos para cada pieza en función de los parámetros de fabricación empleados en cada caso.
- Obtención de los parámetros más adecuados para la mejora de la calidad de las superficies de *downskin* en las piezas fabricadas.
- Reducción de los procesos posteriores a la fabricación para la mejora de las superficies.

Hay algunas limitaciones prácticas que hacen que ciertos parámetros queden fuera del análisis del proyecto a pesar de tener alguna influencia en la calidad de las piezas. Algunos de estos factores no se consideran son los siguientes: el tipo de polvo y el número de láseres que funden el polvo, ya que esto está fijado por la máquina empleada, el espesor de la capa de polvo, ya que se ha buscado un equilibrio entre una calidad de partida y un tiempo de fabricación razonables (una capa de polvo fina podría mejorar la calidad superficial pero llevaría mucho más tiempo de fabricación, y viceversa), el tipo de trayectorias de escaneo, ya que se trabaja con piezas muy pequeñas y no es determinante la forma en la que se escanean las superficies...

La máquina de fabricación aditiva de fusión de capas de polvo metálico empleada para este trabajo es del fabricante Renishaw [08] de un único láser: RenAM 500S. Por otro lado, los softwares empleados en este trabajo para el diseño del proceso de fabricación de las piezas son QuantAM [09], del mismo fabricante que la máquina y Dyndrite [10], un software destacado por dar la opción de dividir las piezas en volúmenes muy diferenciados que permiten tener un control mayor de los parámetros óptimos en cada región. El polvo metálico empleado es una aleación Níquel-Cromo conocida como Inconel 718.

Por otro lado, es importante recordar que este trabajo únicamente tiene en cuenta la calidad de las superficies de downskin, quedándose fuera del alcance del trabajo el resto de las propiedades de las piezas fabricadas. Así, factores muy importantes para este tipo de componentes empleados en la aeronáutica como son la porosidad interna, la distorsión geométrica debido a tensiones térmicas, la resistencia mecánica, o la vida a fatiga, no han sido optimizadas ni analizadas en este trabajo. En estudios posteriores sería interesante realizar un análisis conjunto de todas estas propiedades ya que podrían estar interrelacionadas y tener influencia unas sobre otras.

4 Beneficios que aporta el trabajo

Los procesos de fabricación aditiva han supuesto un avance enorme a la hora de poder obtener piezas con geometrías complejas o con cavidades internas que no se podrían mecanizar de otra manera. Además, estos procesos permiten reducir la cantidad de materiales de partida necesarios, así como el material sobrante generado. Los problemas de downskin de los que se han hablado en los apartados anteriores, afectan tanto a la calidad superficial como a las propiedades de las piezas, por lo que no es únicamente una cuestión estética o de acabado, sino que también entran en juego el desempeño de las piezas y su vida útil. El análisis y la obtención de parámetros específicos para las regiones de downskin pueden suponer un gran avance en el proceso de fusión láser por lecho de polvo, siendo este un método de fabricación utilizado en muchos sectores industriales como la aeronáutica o la automoción, pero también en otros más “humanos” como la odontología o la fabricación de prótesis, que pueden mejorar directamente la calidad de vida y salud de las personas.

4.1 Beneficios técnicos

El principal beneficio técnico de este trabajo es la **mejora de la calidad superficial** de las piezas obtenidas por fusión láser por lecho de polvo en las zonas de downskin. La mejora de la calidad superficial no es un aspecto únicamente estético, sino que también influye en la resistencia mecánica y la vida de los componentes.

La optimización de los parámetros de fabricación ayuda también a fabricar piezas con **inclinaciones más pequeñas respecto a la horizontal** sin necesidad de soportes. Esto permite obtener geometrías más complejas tanto en las caras exteriores como en las cavidades internas que se desee diseñar en las piezas.

Este método de fabricación permite **facilitar el proceso de fabricación**, al realizar todo tipo de geometrías con una sola máquina y una única “herramienta”, sin la necesidad de tener diferentes personas especializadas cada una en un proceso diferente. De esta manera se reduce la complejidad y la cadena de producción necesaria para obtener esa misma pieza a partir de métodos de fabricación convencionales.

4.2 Beneficios económicos

El principal beneficio económico de la mejora de las superficies de downskin deriva de la **reducción de los procesos** necesarios después de la fabricación para asegurar una buena calidad de las piezas. Al ser necesarios menos post-tratamientos después de la fabricación, se reduce también el consumo de materia prima, el desgaste de herramientas de mecanizado para reducir la rugosidad, el número de personas que intervienen en la obtención de la pieza final...

De esta manera, se reduce el **coste asociado a la materia** que se debería mecanizar para mejorar el acabado superficial, se reduce el **coste de herramientas** ya que se emplea una única máquina para la fabricación y se necesitan menos herramientas para los post-tratamientos y se reducen los **costes de personal** ya que hace falta menos personal cualificado para fabricar las piezas

Por otro lado, este método de fabricación aditiva permite también diseñar **piezas con cavidades internas** y asegurar que tienen un buen acabado superficial. Esto reduce directamente la cantidad de material en la pieza y por lo tanto reduce también el **coste de materias primas** para fabricarla. Además de esto, un menor

peso de las piezas implica un menor consumo de combustible durante el vuelo, reduciéndose así el **coste de combustible** en el caso de que las piezas se empleen en el campo de la aeronáutica.

4.3 Beneficios medioambientales

Los beneficios medioambientales de este proyecto están relacionados con los beneficios técnicos y económicos mencionados previamente. El principal beneficio medioambiental tiene que ver con la **reducción de material sobrante** en las piezas de fabricación aditiva. Al obtener directamente piezas con una geometría muy cercana a la geometría final deseada, casi todo el material que se usa durante el proceso es el que conforma la pieza, sin haber mucho desperdicio de material. Esto no ocurre en los procesos de fabricación tradicionales en los que se parte de un tocho de material sobre el que se talla la pieza y en los que se genera mucho desperdicio.

Por otro lado, el polvo metálico sin fundir en cada fabricación, se puede **reutilizar** varias veces mientras conserve sus propiedades. Esta reutilización de la materia prima no se puede dar en los procesos de fabricación por arranque ya que toda la viruta generada debe ser recogida y reciclada pero no puede ser reutilizada directamente.

La **reducción del consumo de combustible** derivado de la reducción del peso de los componentes tiene también un impacto positivo en el medio ambiente. Al consumirse menos combustible, se generan también menos emisiones de gases contaminantes a la atmósfera producidos durante la combustión.

Estos beneficios medioambientales están directamente relacionados con algunos de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) de la Agenda 2030 [11]. El primer ODS al que contribuye este proyecto es el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura. Este ODS está enfocado en la construcción de infraestructuras resilientes, el desarrollo de una industrialización sostenible y el impulso de la innovación. La tecnología de fabricación investigada en este proyecto está todavía desarrollándose y optimizándose por lo que los resultados y conclusiones obtenidos en el trabajo fomentan el uso de tecnologías nuevas e innovadoras. El segundo ODS al que contribuye el proyecto es el ODS 12: Producción y Consumo Responsables. Este ODS se centra en alcanzar modelos de consumo y producción, tanto de energía como de productos, que sean sostenibles con el medio ambiente. Por un lado, la Fabricación Aditiva permite reducir la cantidad de materia prima necesaria y el residuo sobrante generado. Además de esto, el uso de esta tecnología en el sector aeronáutico permite reducir el peso de los componentes y, por lo tanto, el consumo de combustible.



Figura 3. ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura y ODS 12: Producción y Consumo Responsables [11]

5 Marco teórico

5.1 Fusión láser por lecho de polvo (LPBF)

La fusión láser por lecho de polvo, como se introdujo en apartados anteriores, es un proceso de fabricación aditiva (FA) en metales que emplea un láser para ir fundiendo el material en sucesivas capas y formar la pieza deseada. A continuación, se muestran los pasos necesarios que componen este proceso de fabricación.

5.1.1 Diseño del modelo 3D

En primer lugar, se ha de realizar el diseño de la pieza en un programa de diseño asistido por computadora (CAD, de sus siglas en inglés *Computer Aided Design*), como por ejemplo Materialise, Solid Works, Solid Edge, CATIA... Este modelo 3D se importará más adelante en los softwares de preparación de fabricación (como QuantAM y Dyndrite) para diseñar el proceso de fabricación definiendo los parámetros que intervienen en el proceso (regiones de la pieza, soportes, grosor de capa, potencia del láser, patrón a seguir...).

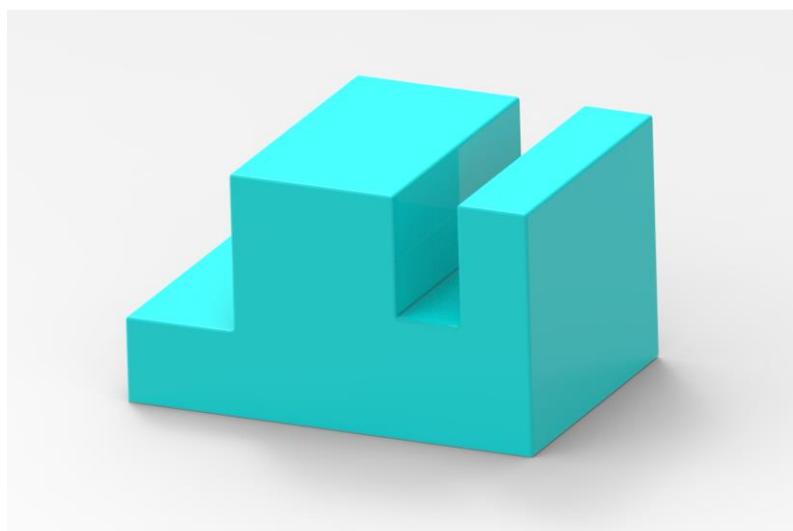


Figura 4. Modelo 3D de una pieza realizado con Solid Edge y renderizado con Keyshot

5.1.2 Proceso de fabricación

Antes de comenzar con la fabricación, se ha de preparar el entorno en el que se lleva a cabo. Para ello, la cámara en la que se realiza el proceso se llena casi por completo de un gas inerte que permite controlar el entorno de trabajo y asegurar unas condiciones óptimas. En el caso de la máquina empleada en este proyecto, la RenAM 500S, se emplea Argón.

Por otro lado, se precalienta también el polvo de metal por debajo de su punto de fusión antes de comenzar a fabricar la pieza para facilitar el posterior fundido por el láser de las zonas que se desee. Una vez el entorno y los materiales de trabajo están preparados, se puede comenzar con el proceso de fabricación.

En primer lugar, se deposita una fina capa de polvo sobre la plataforma de impresión. En esta capa, el láser funde el metal correspondiente a la primera capa de la pieza. La mesa desciende y otra fina capa de polvo es depositada sobre la anterior. Sobre esta capa, el láser vuelve a fundir el material correspondiente a la segunda capa de la pieza, y así sucesivamente hasta fabricar la pieza por completo.

En ocasiones, antes de empezar a fundir las capas correspondientes a la geometría de la pieza, primero se forman unas estructuras de soporte. Estos soportes ayudan a evacuar el calor del material fundido por el láser hacia la bandeja de impresión y sostener la pieza que se fabricará sobre ellos.

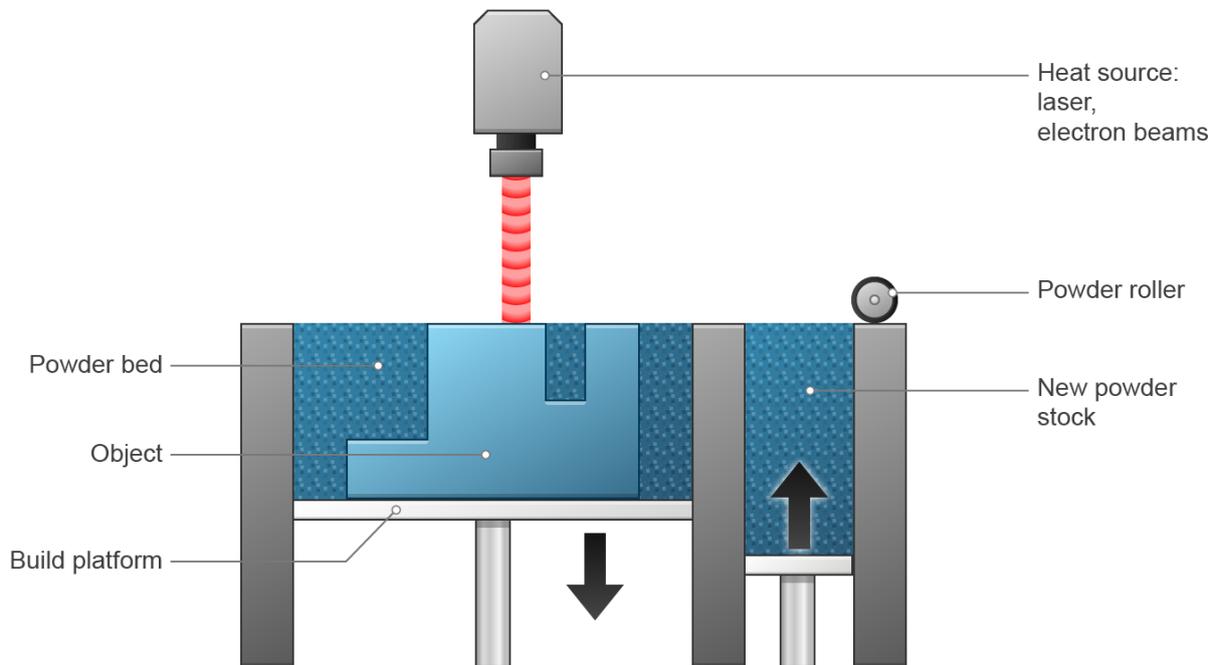


Figura 5. Dibujo esquemático del proceso de PBF [12]

En la Figura 5 se muestra un dibujo esquemático de un sistema de fusión por lecho de polvo en el que aparecen los siguientes componentes:

- La plataforma de fabricación: sobre esta plataforma se van colocando las capas de polvo y va descendiendo sucesivamente después de fundir cada capa de material para depositar la siguiente capa de polvo.
- El sistema de distribución de polvo y *recoater* (en este caso un rodillo): encargados de distribuir el material en finas capas de un grosor determinado.
- El polvo metálico: materia prima de metal en forma de polvo que se funde para formar las capas de la pieza. En este proyecto se emplea el metal conocido como Inconel 718, una aleación de Níquel y Cromo.
- La pieza: corresponde con la parte del polvo que ha sido fundido con el láser y que va formando la pieza final capa por capa. Se encuentra rodeada de la cama de polvo metálico que no ha sido fundido.
- El sistema de suministro de energía: conjunto destinado a energizar el láser y dirigirlo hacia las zonas que se desea fundir en cada capa, con la energía y velocidades de barrido programadas.
- Sistema de extracción del polvo sobrante (este elemento no aparece en el esquema de la figura): elementos destinados a la recogida del polvo metálico que no ha sido fundido en el proceso para usarlo de nuevo.

Una vez la pieza ha solidificado, se puede extraer de la “cama” de polvo metálico sin fundir que lo rodea, recogiendo dicho polvo.

5.1.3 Post - tratamientos del proceso de LPBF

Los componentes resultantes que se obtienen de la fusión láser por lecho de polvo a menudo requieren un post-procesado para alcanzar la pieza final deseada. Estos tratamientos suelen estar relacionados con la retirada de los soportes de la pieza, con la mejora de su acabado superficial (eliminando rugosidades o pequeños defectos) o la mejora de sus propiedades [13]. A continuación, se explican algunos de estos post-tratamientos:

Retirada de los soportes

En muchas ocasiones y dependiendo de la geometría, se fabrican primero unos soportes por debajo de la pieza para mejorar la evacuación de calor del material fundido hacia la bandeja de impresión y sostener algunas zonas de la pieza que de otra manera no aguantarían [14]. Estos soportes también ayudan a reducir la deformación de la pieza debido a tensiones térmicas durante su fabricación. Además, los soportes facilitan también la separación de la pieza de la mesa de impresión ya que, si tuviera una superficie de apoyo muy grande, luego resultaría más complicado extraerla una vez hubiera solidificado y la pieza podría incluso dañarse al separarla de la mesa. En la siguiente imagen (Figura 6) se muestran algunas geometrías utilizadas para los soportes.

Una vez la pieza haya solidificado, primero se debe retirar el conjunto soportes-pieza de la bandeja de impresión. Tras esto, se deben separar dichos soportes de la pieza. Esto se puede realizar mecanizando, por corte o mediante electroerosión por hilo [16].

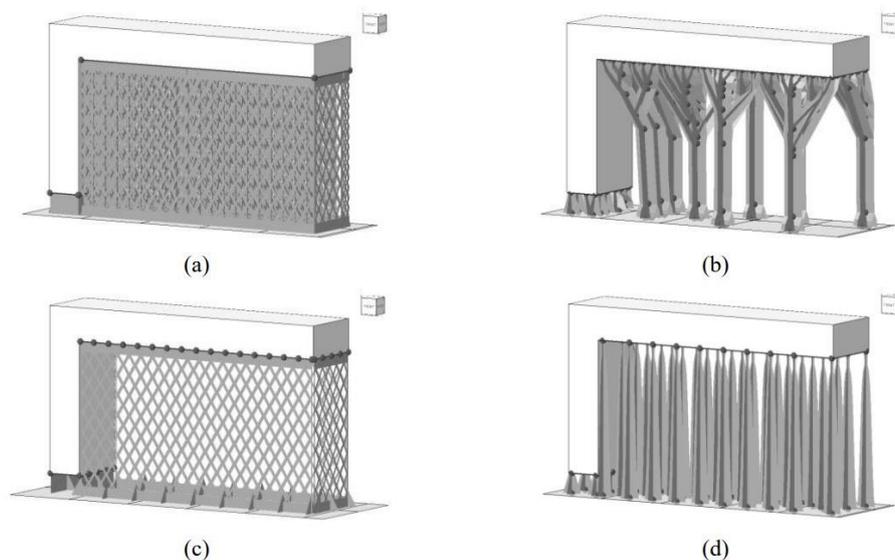


Figura 6. Tipos de estructuras de soporte: bloque (a), forma de árbol (b), polilínea (c), barra (d) [15]

Mejora de la calidad superficial

La calidad del acabado superficial de las piezas puede ser determinante en el desempeño mecánico de las mismas. Una alta rugosidad puede llevar a zonas de concentración de tensiones y una reducción de la vida a fatiga de los componentes [17]. Para la retirada de óxido u otras partículas que hayan podido quedar levemente adheridas a la superficie se puede utilizar un chorro de aire a presión.

En ocasiones, el polvo metálico que se encuentra en contacto directo con metal fundido absorbe parte del calor del láser, fundiéndose también parcialmente y quedando completamente adherido a la pieza. Este

polvo no se despega con el método mencionado anteriormente, sino que debe ser mecanizado o pulido para eliminarlo. Cabe destacar que este problema está muy relacionado con el problema en las superficies de *downskin* que se desea reducir o eliminar en este proyecto. Estos defectos están relacionados con las capas de la pieza que están en contacto directo con el polvo al no tener material ya fundido debajo. Es un problema que podría ser solucionado (o al menos reducido su efecto) teniendo un mayor control en los parámetros empleados con el láser en estas capas y las adyacentes.

Tratamientos térmicos

El calor suministrado por el láser puede generar tensiones residuales debido a las diferencias de temperatura en las distintas zonas de la pieza [18]. Para reducir estas tensiones se puede someter a la pieza a un tratamiento térmico, que también contribuye en la mejora de las propiedades mecánicas de la pieza y la vida a fatiga.

Otro de los tratamientos que se puede aplicar a las piezas obtenidas de la fusión láser por lecho de polvo es el prensado isostático en caliente (HIP, de sus siglas en inglés *Hot Isostatic Pressing*) [19]. Este proceso consiste en someter a un componente a altas temperaturas y presiones isostáticas de forma simultánea [20], permitiendo reducir las microporosidades internas y mejorando de esta manera las propiedades mecánicas de la pieza. También reduce la porosidad de las capas cercanas a la superficie externa de la pieza, mejorando también el acabado superficial. Una de las limitaciones del prensado isostático en caliente es que puede modificar las dimensiones de las piezas, por lo que es necesario considerar esta contracción a la hora de diseñar las piezas a fabricar.

5.2 Defectos en las superficies *Downskin*

La forma de fabricar en la fusión láser por lecho de polvo deriva en la formación de piezas con cierta rugosidad. Esta rugosidad se ve afectada por el material, el tamaño del polvo y su distribución, el láser, el grosor de las capas de polvo y otros muchos factores [21].

Las *downward-facing surfaces* (superficies que miran hacia abajo) o *downskin surfaces* son las capas de la pieza que se encuentran en contacto con la cama de polvo metálico sin fundir. Por otro lado, las superficies que miran en la dirección opuesta se denominan *upward-facing surfaces* (superficies que miran hacia arriba) o *upskin surfaces* [22].

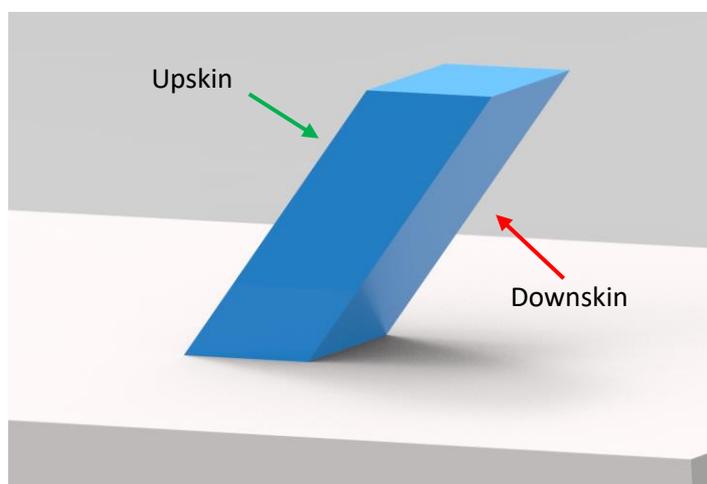


Figura 7. Zona de Upskin y Downskin de una pieza con paredes inclinadas

Las superficies de *downskin* presentan mayor rugosidad que el resto de superficies. Esta rugosidad podría afectar no solo a la calidad superficial, sino también a las propiedades de los componentes fabricados como las propiedades mecánicas o la vida a fatiga, por lo que es importante reducirla todo lo posible. En las zonas de *upskin* aparece una menor rugosidad ya que en estas capas el haz láser impacta directamente sobre la superficie y funde por completo el metal. Además de esto, en las zonas de *upskin* el calor del láser es disipado a través de las capas inferiores de metal ya fundido y parcialmente solidificado, mientras que en las superficies de *downskin*, el calor debe ser disipado por el polvo que se encuentra debajo, habiendo peor transferencia de calor entre la pieza y el polvo, y adhiriéndose además parte del polvo debido al calor. Esto se puede observar en la Figura 8.

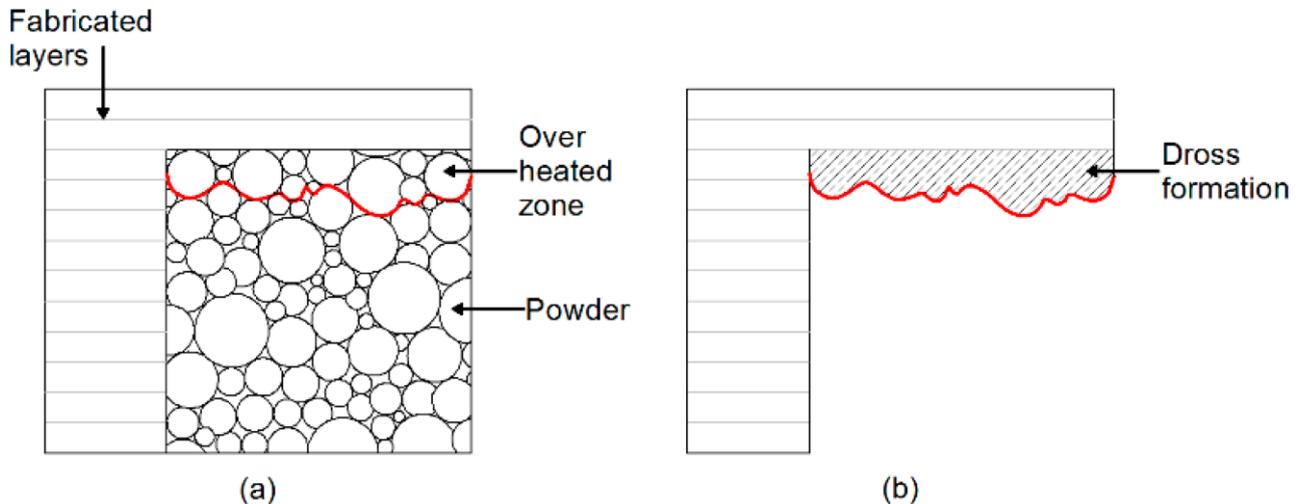


Figura 8. Dibujo de la zona sobrecalentada sobre el polvo suelto y (b) Formación de escoria resultante en la parte final [23]

En el proceso de fusión láser por lecho de polvo hay una gran cantidad de factores que intervienen. Por ello, el nivel de rugosidad alcanzado en las zonas de *downskin* se ve condicionado por una gran variedad y cantidad de parámetros. Algunos de estos parámetros que intervienen tienen que ver con la geometría de las piezas (tamaño de las piezas, espesor de paredes delgadas, ángulo de inclinación respecto a la horizontal de las superficies inclinadas...), con los materiales utilizados (el tipo y tamaño del polvo metálico, el tipo de láser, el gas inerte de la cámara de fabricación...) y con los parámetros utilizados durante el proceso de fabricación como pueden ser el espesor de capa, la potencia del láser, la cantidad de capas consideradas para aplicar los parámetros de *downskin*, el número de bordes establecidos, las trayectorias de escaneado del láser...

Para poder desarrollar un proceso que proporcione un resultado óptimo de rugosidad en las zonas de *downskin* es necesario conocer los parámetros que se pueden modificar en el proceso de fusión láser por lecho de polvo. En el siguiente apartado se explican cuáles son estos parámetros que intervienen en este proceso de fabricación aditiva empleando la máquina de Renishaw RenAM 500s.

5.3 Parámetros de proceso de LPBF

La máquina de FA de LPBF empleada permite fijar cientos de parámetros antes de comenzar con el proceso de fabricación. A continuación, se exponen los parámetros más significativos, destacando aquellos que se van a variar para tratar el problema de defectos en las superficies de *downskin*.

5.3.1 Espesor de la capa de polvo

El espesor de capa es el espesor de cada capa de polvo metálico (en mm) que se deposita en la dirección de fabricación (la vertical). Un grosor de capa mayor permite reducir los tiempos de fabricación al tener que realizar menos pasadas para obtener la pieza final. Sin embargo, una capa muy ancha podría afectar al fundido local del material y por lo tanto a su microestructura [24]. Normalmente, este espesor de capa se fija entre los 20 y los 120 μm (entre 0,02 y 0,12 mm).

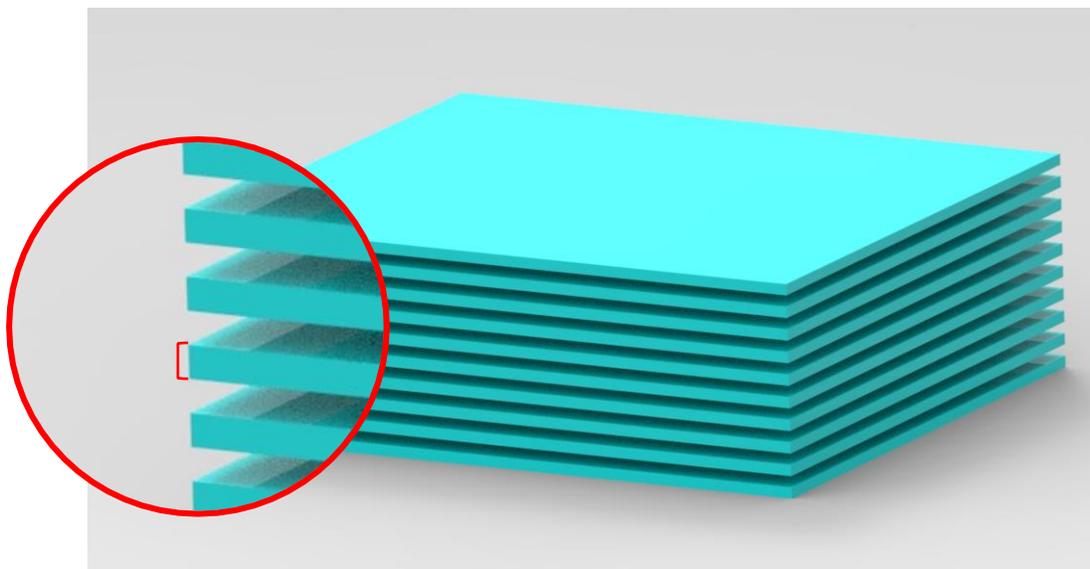


Figura 9. Representación en un modelo 3D del espesor de capa

5.3.2 Modo de trabajo del haz láser: pulsado y continuo

El haz láser es la fuente de calor empleada en el proceso de LPBF para fundir el polvo correspondiente a la sección de la pieza en cada capa, por lo que la distribución temporal de esta energía puede ser un parámetro clave en la calidad de las piezas fabricadas [25]. El láser puede tener dos modos de funcionamiento, haz continuo o haz pulsado (CW o PW, del inglés *Continuous Wave* y *Pulsed Wave* respectivamente). El haz continuo suministra unas mayores energías al polvo metálico, generando “piscinas” de material fundido más grandes y una disipación del calor más lenta. Esto puede mejorar las propiedades mecánicas de las piezas pero tiene un menor control de las dimensiones, aún más en piezas pequeñas. El haz pulsado suministra la energía en forma de “puntos”, por lo que permite un control más preciso de las piscinas de material fundido y una menor disipación del calor en la pieza. Sin embargo, al no disponer de un suministro continuo de energía, pueden aparecer poros internos de aire o material que no se llega a fundir [26] (ver Figura 10).

Por la naturaleza de las piezas analizadas en este trabajo y el tipo de defecto que se desea tratar (adhesión de polvo metálico en las superficies de *downskin*) de forma general se va a emplear el láser en modo pulsado. Este modo permite tener un mayor control sobre el calor que se disipa hacia el polvo y que es el responsable de que se adhieran partículas a la pieza. Más adelante en este trabajo, en el apartado de *Estado del arte* se muestra la explicación de esta elección a partir de estudios realizados previamente en esta materia.

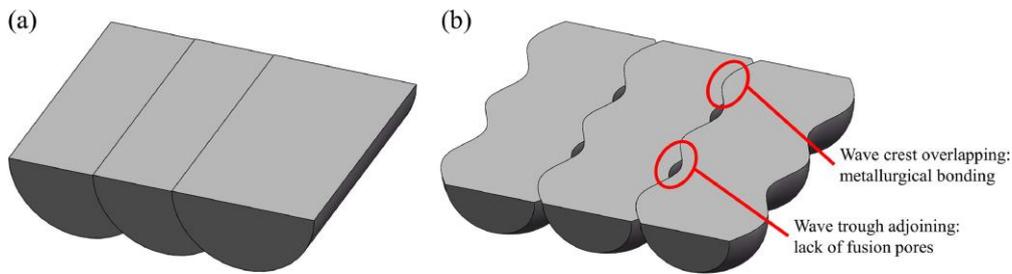


Figura 10. Diagramas esquemáticos que muestran la superposición de las trayectorias en los modos de onda continua (a) y onda pulsada (b) [26]

5.3.3 Parámetros de escaneo del láser

Los parámetros principales del escaneo del láser que se van a modificar son la distancia entre puntos (μm), el tiempo de exposición (μs), la potencia (W) y la distancia entre las trayectorias (*hatch*) del láser (μm). Algunas de las máquinas de fusión láser por lecho de polvo no permiten modificar la distancia entre puntos y el tiempo de exposición, sino que únicamente permiten modular la velocidad de barrido. En la máquina de Renishaw empleada en este proyecto sí se pueden elegir estos dos parámetros de forma separada por lo que se tiene un mayor control del barrido del láser.

Distancia entre puntos (μm)

La densidad de energía de la fuente de calor suministrada por el haz láser puede ser representada de forma teórica por una distribución Gaussiana en 3D (ver Figura 11), en la que el centro del haz presenta un máximo de energía [26]. La distancia entre puntos corresponde a la distancia que hay entre los centros de dos puntos sucesivos de la trayectoria (Figura 12). Como norma general, dos haces sucesivos deben superponerse como mínimo 1/3 de su anchura para evitar la porosidad interna de las piezas.

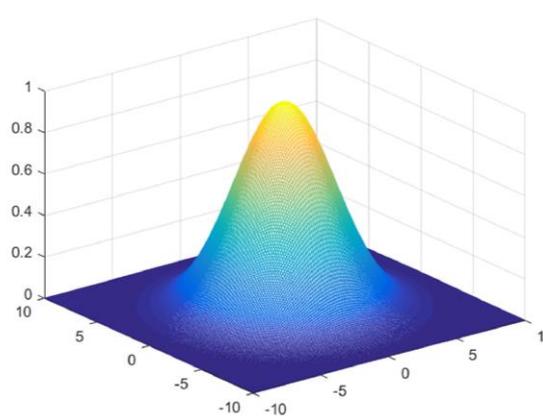


Figura 11. Diagrama esquemático de la densidad de energía Gaussiana del láser [26]

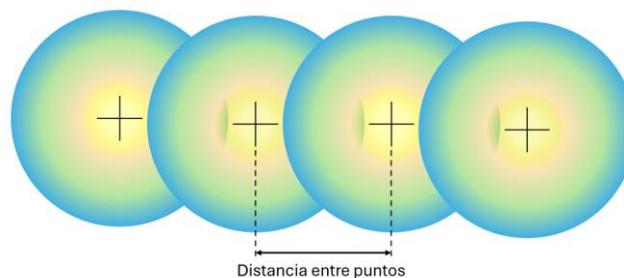


Figura 12. Dibujo esquemático de la distancia entre puntos del haz láser

Tiempo de exposición (μs)

El tiempo de exposición es el tiempo (normalmente expresado en microsegundos, μs) que el láser va a permanecer encendido en cada punto de la trayectoria. En ocasiones, en lugar de definir por separado una distancia entre puntos y un tiempo de exposición, se fija una velocidad de barrido.

Potencia (W)

La potencia fija la intensidad del láser, y se mide en Vatios (W). Una alta potencia permite fundir todo el material correspondiente a la sección de la pieza en cada capa, pero también requiere de mayor difusión del calor hacia el polvo metálico, lo que puede generar mayor rugosidad en las caras superficiales de la pieza. Además, este aumento de potencia puede derivar en distorsiones térmicas debido a mayores diferencias de temperatura entre distintas zonas de la pieza.

Distancia entre las trayectorias (*hatch distance*) (μm)

Las líneas que marcan las trayectorias del láser están formadas por puntos sucesivos que se superponen uno detrás de otro. La distancia entre las trayectorias es la distancia que hay entre cada línea que define el barrido del láser en una capa (ver Figura 13). Al igual que en la distancia entre puntos, en la distancia entre trayectorias también conviene que sea lo suficientemente pequeña como para que las trayectorias se superpongan y prevenir así la aparición de porosidades internas. En la Figura 14 se muestran dos distancias entre las trayectorias distintas ($hd1$ y $hd2$, *hatch distance* 1 y 2 respectivamente).

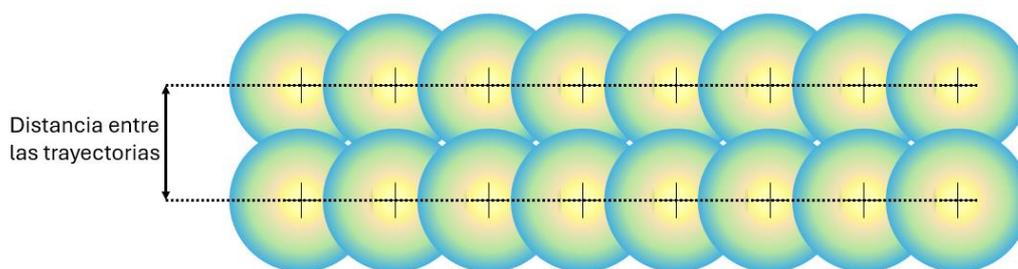


Figura 13. Dibujo esquemático de la distancia entre las trayectorias del láser

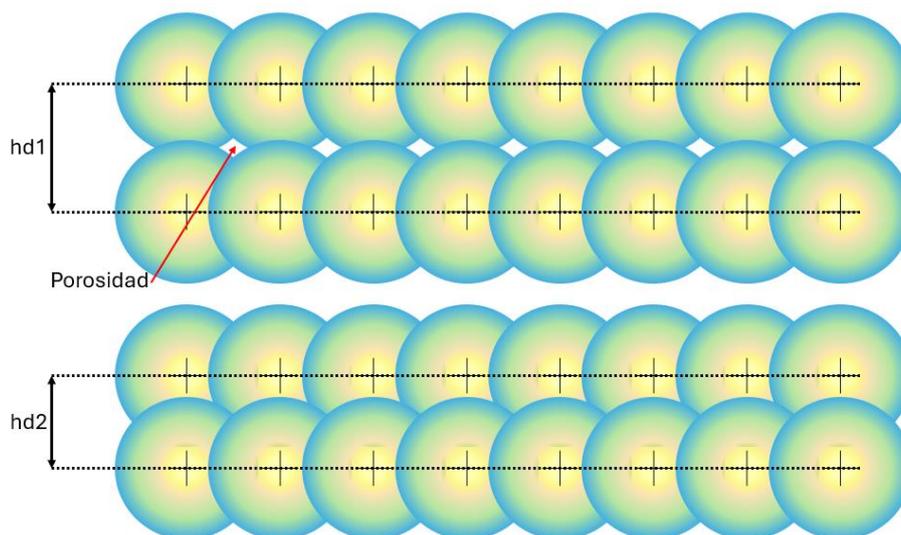


Figura 14. Dibujo esquemático de los puntos del haz del láser para dos distancias de trayectoria diferentes ($hd1$ y $hd2$)

5.3.4 Zonas de barrido

El barrido del escáner representa las trayectorias que sigue el láser en cada capa. El tipo de barrido que realiza el láser depende de la zona de la pieza que se encuentre escaneando, tanto en volumen como en cada sección de la pieza. Cada capa puede estar dividida en tres tipos principales: volumen, *upskin* y *downskin*¹.

Las zonas de *upskin* son aquellas que no se cubren de otras capas de polvo fundido por encima. Las zonas de *downskin* representan las regiones que no tienen otra capa de material fundido por debajo, sino que se encuentran en contacto directo con el polvo metálico sin fundir. Estas son las zonas en las que se centra este proyecto ya que, al estar en contacto directo con el polvo, el calor disipado por el material fundido adhiere polvo a la superficie y empeora el acabado superficial de estas zonas. El volumen corresponde a la zona interna de la pieza que no está en contacto con ninguna de las superficies externas.

La división de las piezas en estas zonas permite establecer parámetros diferentes para cada una que optimice la calidad de las piezas.

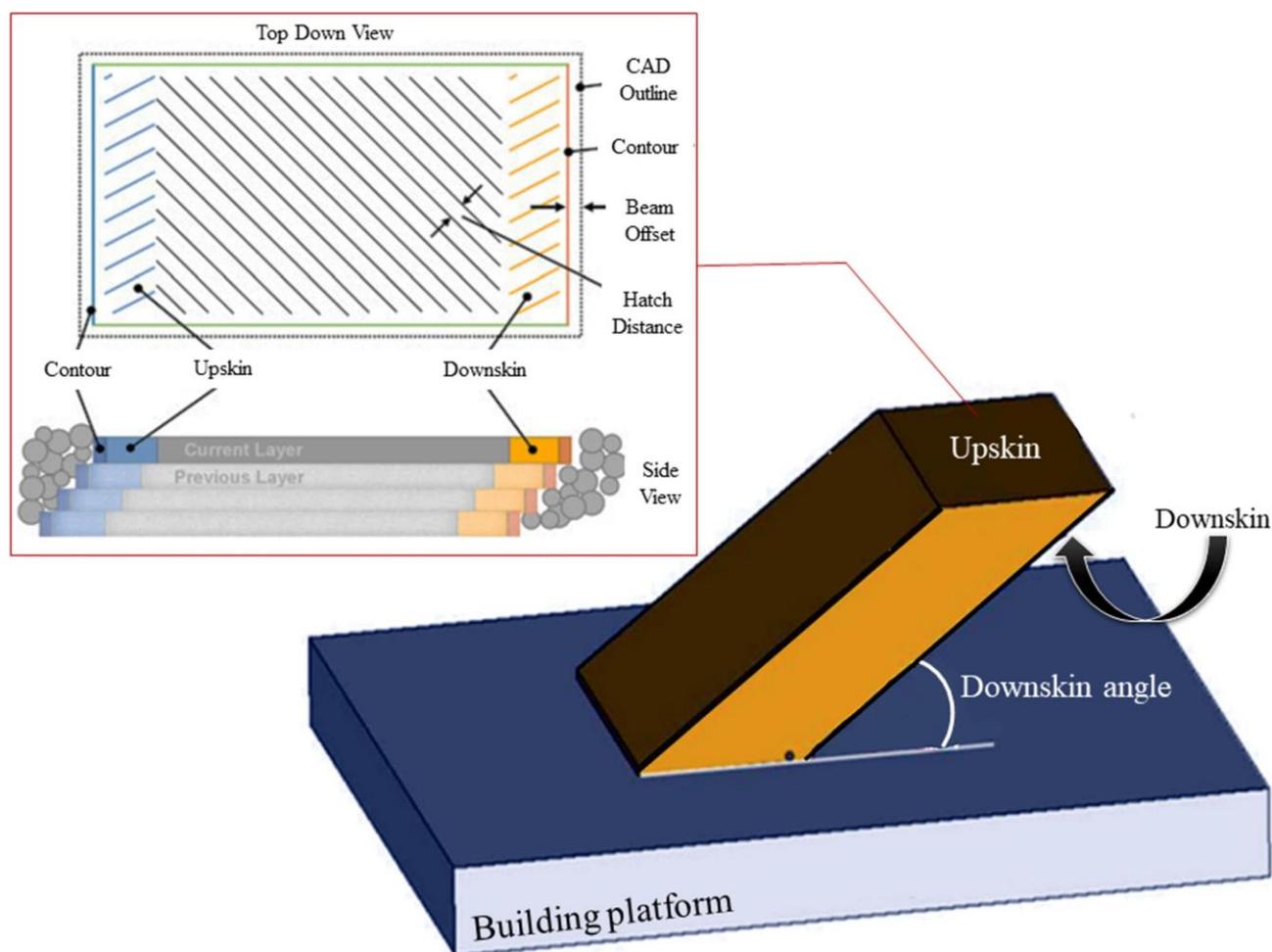


Figura 15. Esquema de los parámetros de proceso de *upskin* y *downskin* [27]

¹ Se utilizan los nombres en inglés ya que la mayoría de artículos y documentación aparece en inglés y emplea estos nombres para definir estas regiones y otros parámetros del proceso.

A nivel de capa también se puede dividir cada sección en otras tres zonas que son los bordes (*Borders*), contornos de barrido (*Fill contours*) y relleno de barrido (*Fill hatch*). La imagen que se muestra a continuación representa estas tres zonas en una capa de la pieza (sin considerar las zonas de *downskin*, *upskin* y *volumen*).

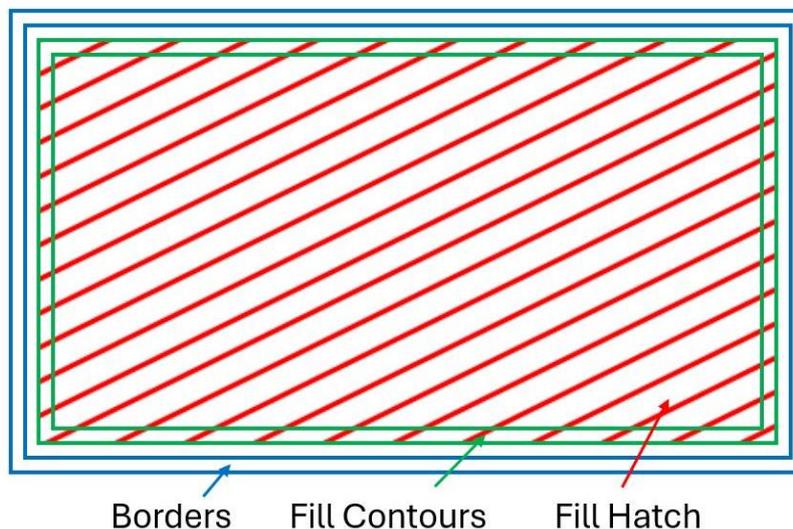


Figura 16. Dibujo esquemático de las partes de cada capa a nivel de sección

Borders

Los bordes son las trayectorias que recorren el contorno de la sección de la pieza en cada capa. La selección correcta de los parámetros de fabricación de esta zona ayuda a mejorar las propiedades y el acabado superficial de las capas más externas. En ocasiones se utilizan bordes adicionales (additional borders) además del borde más exterior para tratar de mejorar más aún el acabado superficial de la pieza. La distancia entre bordes (border distance) corresponde a la separación que hay entre el borde exterior y los bordes adicionales.

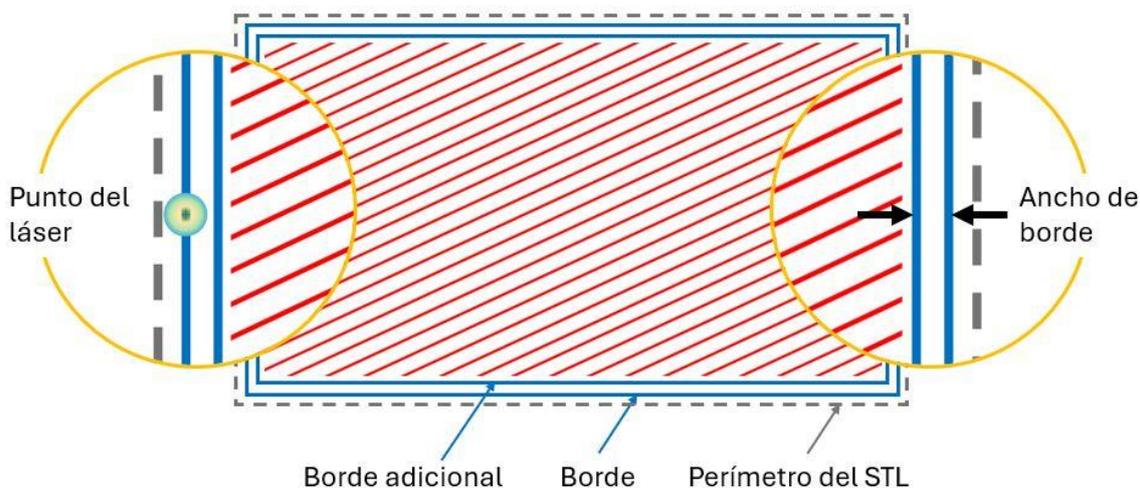


Figura 17. Dibujo esquemático de los bordes, el perímetro de la sección real y un punto del haz láser

La compensación del haz láser se emplea para desviar el borde real (del archivo .STL de la pieza) que se muestra en línea gris discontinua. Esta compensación se utiliza de manera que la parte más externa de los puntos del láser coincida con el borde del .STL, en lugar del centro del láser, para conseguir las dimensiones correctas de la pieza. Dicha compensación suele establecerse a partir del radio del haz láser.

Fill Contours

Los *fill contours* son bordes que se establecen en la zona de *hatch*. Tienen un propósito similar al de los bordes: disminuir la porosidad en la pieza, además de asegurar una buena unión entre el relleno y los bordes. Se establecen fijando la medida de la separación entre el borde más exterior y el primer contorno del barrido, y la distancia entre los propios contornos de barrido.

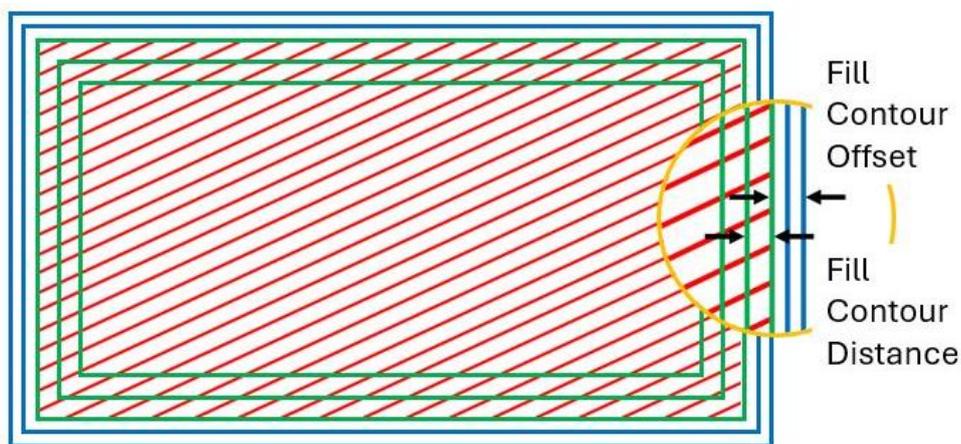


Figura 18. Dibujo esquemático de los contornos de barrido (en verde)

Fill Hatch

El *fill hatch* representa el barrido que hace el láser en la zona central de la sección de la pieza en cada capa. Este escaneo viene definido principalmente por los siguientes parámetros: la separación entre dos trayectorias contiguas (*fill hatch distance*), la distancia entre el contorno definido por el *fill hatch* y el borde más interno (*fill hatch offset*) y un valor mínimo de longitud de trayectoria por debajo del cual el láser no debe estar encendido (*filter length*), ya que no es necesario barrer un vector cuya longitud se encuentra por debajo del radio del haz láser.

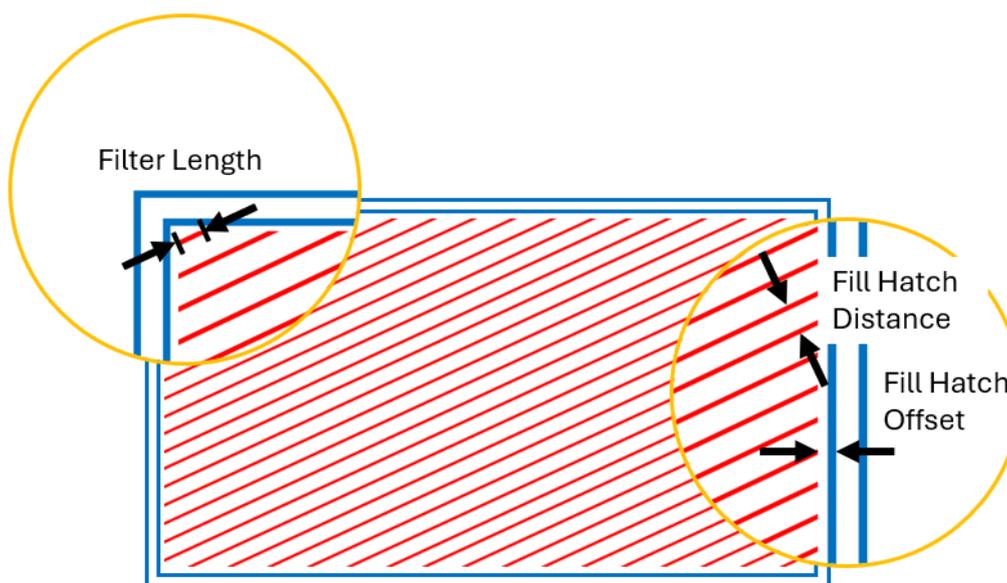


Figura 19. Dibujo esquemático de los parámetros de Fill Hatch

Patrones de Fill Hatch

A la hora de recorrer la sección de cada capa y dibujar las trayectorias del láser hay cuatro patrones principales. Estos son: *meander* (“serpenteo”), *stripes* (“rayas”), *chessboard* (“tablero de ajedrez”) y *total fill* (“relleno completo”). Las siguientes imágenes muestran de forma gráfica estos cuatro patrones (las líneas rosas representan el láser apagado).

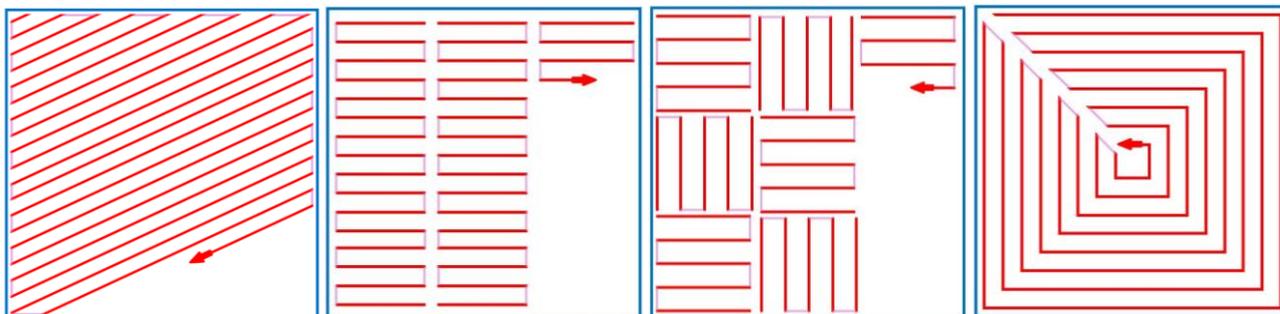


Figura 20. Fill Hatch: Meander, Stripes, Chessboard y Total fill

El patrón **Meander** consiste en rellenar la superficie a escanear mediante líneas paralelas que recorren la sección de un lado a otro. Este patrón presenta la ventaja de que es sencillo de definir y recorre la sección de forma rápida y eficiente. Sin embargo, presenta una distribución de temperaturas muy cambiante en función de la zona de la sección que se observe. En una esquina de la sección el láser pasa cercano al mismo punto de forma muy seguida en el tiempo (porque las rayas son muy cortas y recorre menos distancia entre dos pasadas consecutivas), mientras que en el centro tiene que recorrer mucha más distancia para pasar por el mismo punto en dos pasadas consecutivas.

El patrón **Stripes** se divide la sección principal en tiras que se recorren por separado con el patrón anterior (*Meander*). Esto permite que el láser tarde el mismo tiempo en pasar por el mismo punto en dos trayectorias consecutivas, y por lo tanto se consigue una distribución de temperaturas más constante. Las tiras en las que se divide la sección se deben superponer para evitar que queden huecos sin cubrir y evitar la aparición de porosidades en la pieza (en el dibujo de la Figura 20 se ha dejado un hueco entre medias para que se pueda ver bien el trazado).

El patrón **Chessboard** es muy similar al anterior, pero en lugar de dividir la sección en tiras, se divide en recuadros (similar a un tablero de ajedrez). Este método no se suele emplear porque consume mucho más tiempo y no compensa para la mejora que supone respecto con el anterior.

El patrón **Total fill** se rellena toda la sección con bordes adicionales hasta llegar a recorrer toda el área. Este método suele ser utilizado para fabricar los soportes ya que suelen ser muy pequeños en sección y no compensa emplear más tiempo con otro patrón más lento.

Rotación del Fill Hatch

En apartados anteriores se ha explicado que uno de los factores a tener en cuenta en este proceso de fabricación es el calentamiento del polvo y la distribución de temperaturas. Si el láser recorriera las capas de polvo con el mismo patrón y con las trayectorias en la misma orientación, habría zonas del material que se irían calentando más capa tras capa al escanear una línea encima de la anterior. Para evitar el deterioro del polvo o el agravamiento de las propiedades de las piezas por el aumento excesivo de la temperatura y los gradientes generados, se recomienda ir rotando el patrón en cada capa. Se recomienda rotar las trayectorias

un ángulo de 67° porque este valor asegura que no se escanee una línea en la misma posición durante 180 capas consecutivas [28]. La siguiente imagen muestra un ejemplo de la rotación de capas sucesivas usando el patrón de *Meander*.

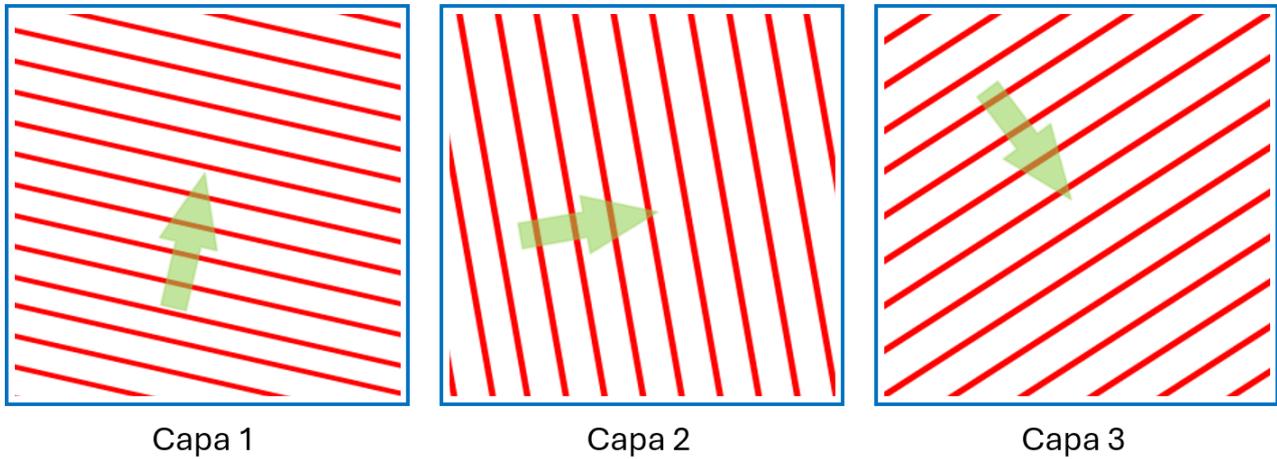


Figura 21. Rotación del Fill Hatch

5.3.5 Principio de variación de parámetros de downskin

En apartados anteriores se explicaba el problema de rugosidad de las regiones downskin comparado con el resto de la pieza. Mientras que en el volumen de la pieza el calor del láser es absorbido por las capas que tiene por debajo, las superficies de downskin están en contacto directo con el polvo por lo que este calor llega al polvo y éste se adhiere a la pieza [29].

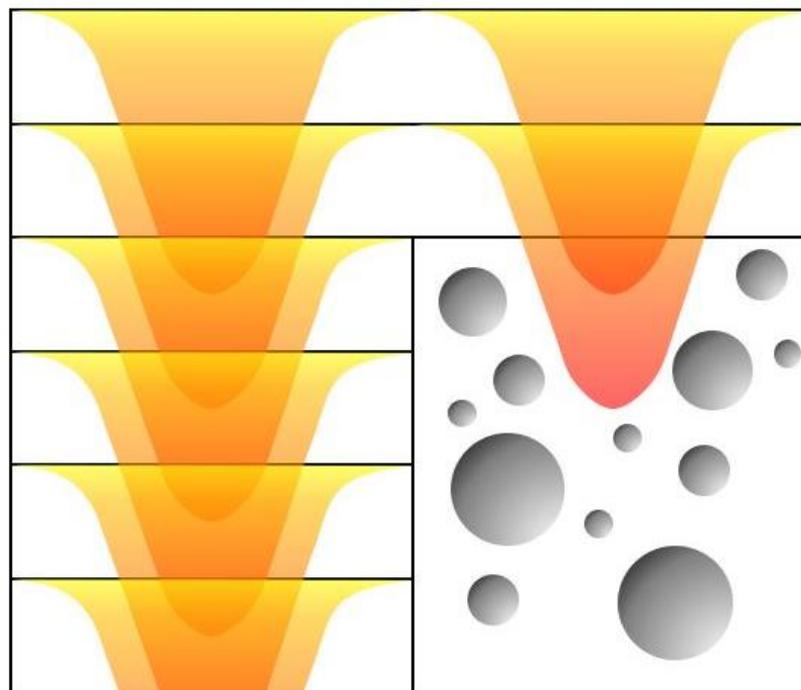


Figura 22. Esquema del problema de downskin del calor transmitido al polvo metálico

Para evitar este problema, la idea es modificar los parámetros del láser, tanto en la capa que está en contacto directo con el polvo, como en algunas capas que se encuentren sobre esta (ya que también la energía suministrada en estas capas alcanza al polvo metálico) en las regiones de downskin. Por lo tanto, aplicando diferentes parámetros según las regiones, se podría obtener un mejor acabado en la pieza y, en concreto, en las zonas de downskin. La siguiente imagen muestra un esquema de esta idea (Figura 23).

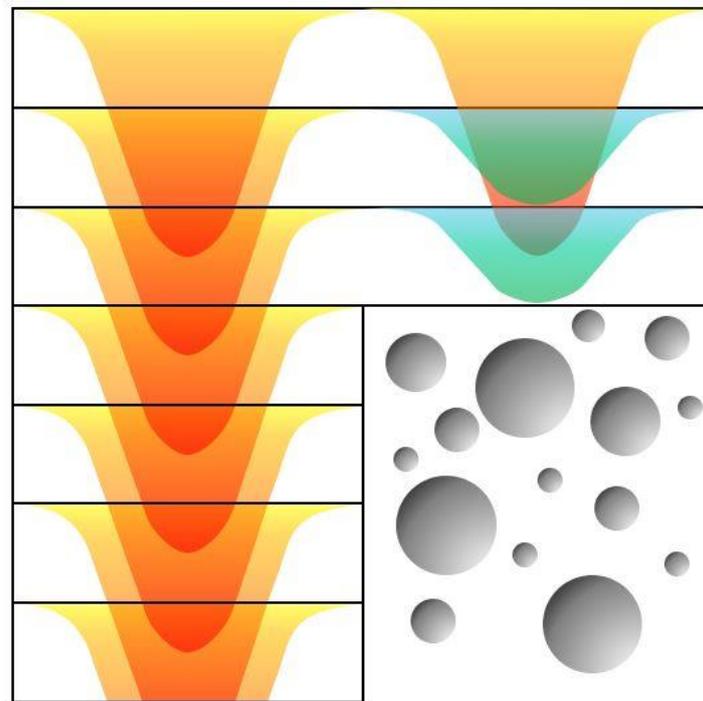


Figura 23. Esquema de la solución al problema de downskin para evitar que la energía del láser alcance al polvo metálico

Por lo tanto, dividiendo la pieza a fabricar en diferentes zonas y controlando los parámetros de cada zona para que se adapten lo mejor posible a su geometría, se podrían mejorar los resultados obtenidos por fusión láser por lecho de polvo en las zonas de downskin.

6 Estado del arte

Con el fin de mejorar las piezas obtenidas de LPBF en lo relacionado con el problema de *dosnwwkin*, es necesario entender todos los factores que juegan un papel en la formación de rugosidad en estas zonas, así como conocer todos los parámetros que se pueden modificar en el proceso. Anteriormente en este trabajo se realizaba una introducción de los parámetros más significativos que se pueden variar en la máquina que se emplea para el caso de estudio. A continuación, se muestran los resultados que se han obtenido previamente por otros autores en lo relativo a este tema en estudios previos, tomando estos resultados como punto de partida para la optimización de los parámetros de trabajo en las zonas de *downskin*.

Modo de trabajo del láser

El modo de trabajo del láser se corresponde con la forma en la que el láser suministra la energía para fundir el polvo e ir formando las capas de la pieza. Este modo de emisión puede ser continuo (líneas continuas en la que el láser permanece encendido) o pulsado (las trayectorias que recorre el láser están definidas por puntos discretos en los que el láser se enciende).

De forma general, se ha estado utilizando el haz láser en modo continuo. Sin embargo, estudios recientes apuntan que el modo pulsado tiene una serie de ventajas frente al continuo que se han de considerar. Algunas de estas ventajas son que minimiza la distorsión térmica y que aumenta la resolución espacial para estructuras delgadas, debido a que se tiene un mayor control del suministro de energía. En piezas de gran tamaño se ha observado que el método pulsado puede derivar en aparición de porosidades y reducción de precisión dimensional, pero en piezas pequeñas ocurre todo lo contrario, siendo el haz pulsado más beneficioso en este último caso [30].

De esta manera, el método que conviene emplear para las piezas de estudio de este trabajo es el **modo de trabajo pulsado**. En dicho modo se puede además fijar la distancia entre dos puntos consecutivos de la trayectoria del láser y el tiempo de exposición del láser en cada punto, teniendo un gran control sobre el proceso.

Espesor de la capa de polvo

El espesor de capa es el espesor de la capa de polvo que se deposita para fundir cada sección de la pieza. Como norma general, este espesor de capa suele fijarse entre los 10 y los 120 μm . En primer lugar, se ha demostrado que el espesor de capa es determinante en la calidad de la cama de polvo. Esto se debe a que los espesores de capa pequeños permiten tener una densidad de empacamiento mayor que los grandes, mientras que los grandes permiten tener una distribución de tamaño de las partículas de polvo más cercana a la Gaussiana [31].

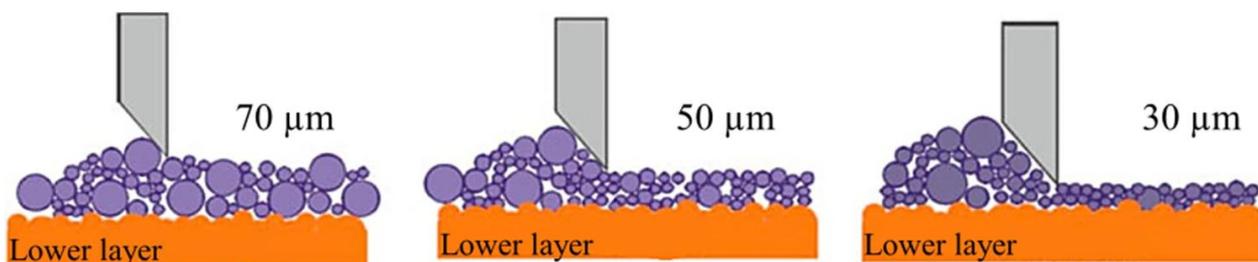


Figura 24. Distribución del polvo con cuchilla para diferentes espesores de capa [31]

Como se observa en la Figura 24, un espesor de capa menor implica una menor cantidad de espacios sin cubrir por el polvo metálico, y por lo tanto una mayor densidad de empacamiento y menor riesgo de aparición de porosidades internas.

En otros estudios se ha analizado también la rugosidad de las superficies dependiendo del espesor de capa utilizando perfilómetro y microscopio electrónico de barrido. En estos estudios se observa de nuevo cómo la calidad superficial mejora con la disminución del espesor de capa. En la siguiente imagen se muestra la diferencia de rugosidad entre un espesor de capa de 20 y otro de 30 μm respectivamente.

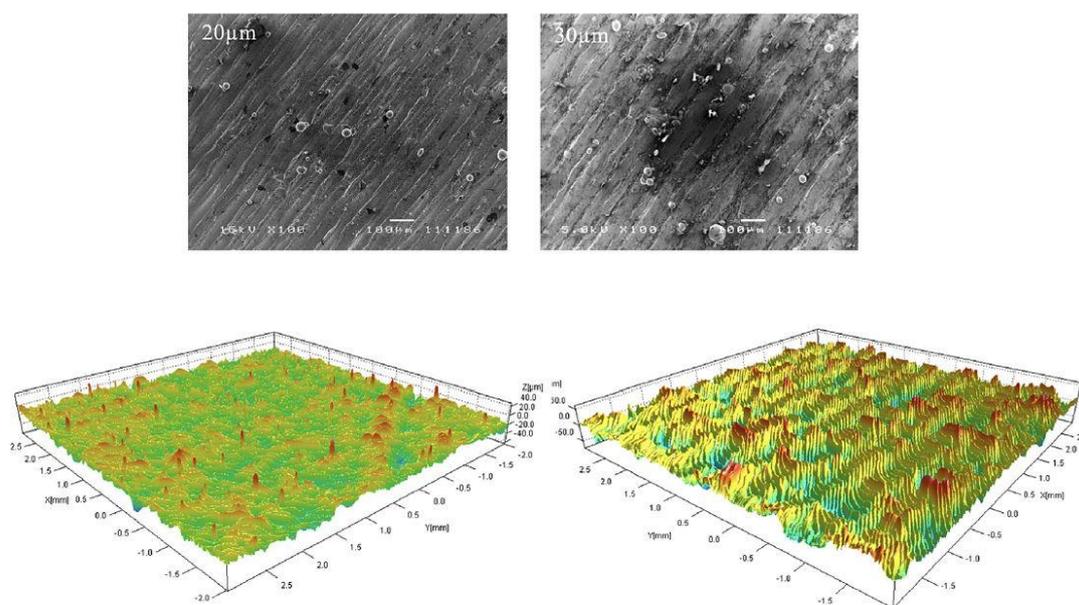


Figura 25. Morfología de la superficie de muestras fabricadas con diferentes espesores de capa de polvo [32]

Como se explicaba, el resultado de un espesor de capa menor (imágenes de la izquierda) es mejor que cuando se utiliza un espesor mayor, presentando menos “picos” en la superficie y, por tanto, menor rugosidad.

En este trabajo se emplea un **espesor de capa de polvo de 60 μm** , ya que este espesor es el utilizado en muchos estudios previos y se debe encontrar un equilibrio entre un mejor resultado de la rugosidad con un espesor de capa pequeño y un bajo tiempo de fabricación del proceso con un espesor de capa más grande. Una reducción de este espesor permitiría obtener mejor acabado superficial, pero a costa de aumentar mucho el tiempo.

Estrategia de barrido

Las estrategias de barrido son los patrones de trayectorias a seguir por el láser cuando escanea cada capa de la pieza. Como se explicaba en el marco teórico, los cuatro tipos principales son *Meander*, *Stripes*, *Chessboard* y *Total fill*. El método de *Total fill* conviene utilizarlo únicamente para fabricar los soportes y no para el volumen de la pieza. Por otro lado, la estrategia de *Chessboard* es muy similar a la de *Stripes*, pero consume mucho tiempo para la poca mejora que supone, por lo que esta estrategia se ha descartado para este trabajo. Esto nos deja únicamente dos estrategias a considerar: *Meander* y *Stripes*. La técnica de *Meander* rellena toda la superficie de trayectorias paralelas que van de un extremo a otro de la capa. La técnica de *Stripes* divide la superficie en tiras, rellenas estas tiras con trayectorias paralelas unas a otras de un lado a otro. En la técnica de *Stripes* la distancia que recorre el láser en cada línea es más corta. La longitud de las trayectorias más cortas ayuda a reducir las tensiones térmicas en la pieza ya que transcurre menos tiempo

desde que se pasa por un punto de la trayectoria hasta que se vuelve a recalentar al pasar por una línea cercana. Esto se puede observar en la siguiente imagen, en la que se muestra que el gradiente de temperaturas que sufre un punto es mucho mayor al tener trayectorias más largas.

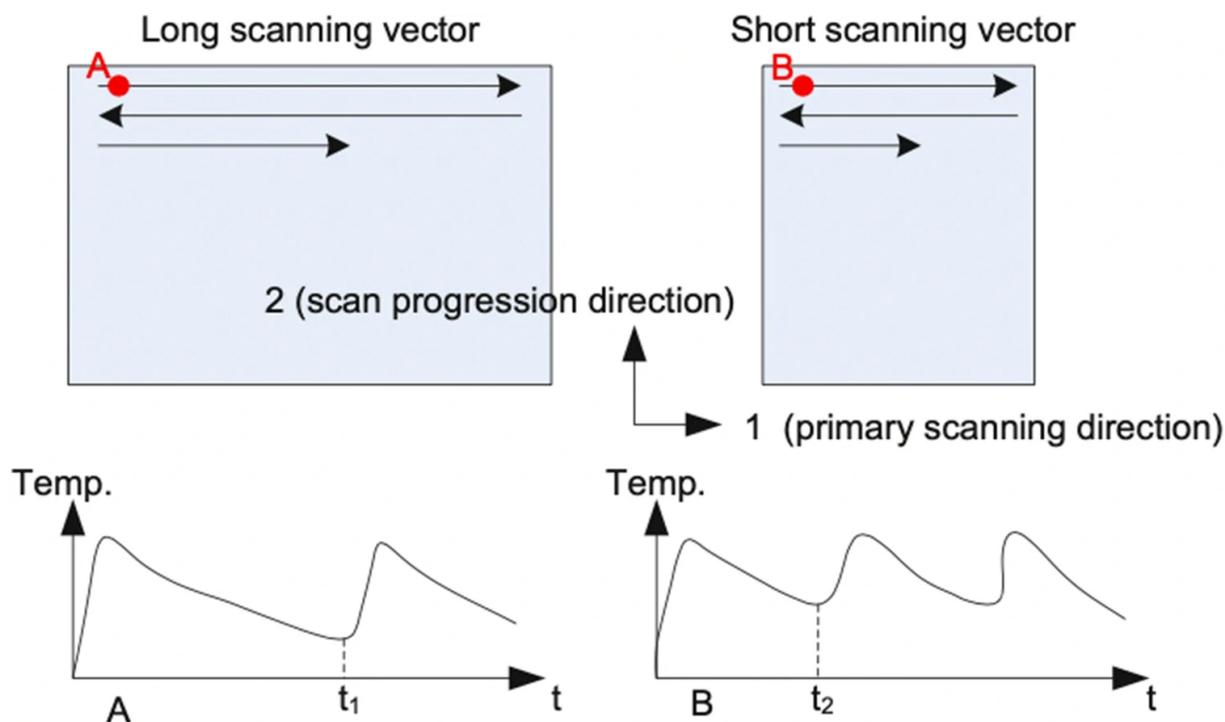


Figura 26. Historial térmico de dos estrategias de escaneo diferentes con diferentes longitudes de vector [33]

Por lo tanto, en este trabajo se emplea la técnica de **Stripes** para realizar el escaneo de las secciones de las piezas al ser el patrón que mejores resultados da de forma general.

Además de esto, se recomienda ir rotando el patrón en cada capa sucesiva para reducir la anisotropía y la distorsión térmica. Como ya se mostraba anteriormente, el ángulo de rotación que permite aumentar el número de capas que hay desde que unas mismas trayectorias se repitan es de 67°.

Densidad de energía volumétrica

La densidad de energía volumétrica es un término que aparece en muchos de los estudios realizados acerca de la rugosidad y la calidad de las piezas metálicas obtenidas del proceso de fusión por lecho de polvo. La densidad de energía hace referencia a la energía por unidad de volumen, y se puede obtener a través de diferentes parámetros dependiendo del modo del láser. En el caso de tener un modo de barrido pulsado, la densidad de energía volumétrica se define a partir de la siguiente expresión [25]:

$$VED_1 = \frac{L_p \times t}{h \times d_h \times d_p} \left[\frac{J}{mm^3} \right] \quad (1)$$

Ecuación de densidad volumétrica de energía [25]

Donde: L_p representa la potencia del láser (W), t el tiempo de exposición del láser (μs), h el ancho de capa (μm), d_h la distancia de hatch (distancia entre dos líneas adyacentes de las trayectorias del láser) (μm), y d_p la distancia entre puntos (μm). Si reescribimos la ecuación con las abreviaturas de cada parámetro que sean

más parecidas a las que se emplean por la máquina utilizada en este trabajo, obtenemos la siguiente expresión:

$$VED = \frac{P \cdot ET}{PD \cdot BD \cdot LT} \quad (2)$$

Donde P: Potencia [W], ET: Exposure Time (tiempo de exposición) [μs], PD: Point Distance (distancia entre puntos) [μm], BD: Border or Contour distance (distancia de hatch) [μm], LT: Layer powder Thickness (espesor de la capa de polvo) [μm].

Habiendo definido el término de densidad volumétrica de energía, se pueden analizar los resultados obtenidos en lo relativo a este factor en cuanto a la rugosidad. Muchos estudios parecen indicar que la rugosidad disminuye con la disminución de la densidad volumétrica de energía. Esto implica que, como norma general, la rugosidad debería disminuir con una menor potencia y un menor tiempo de exposición del láser, y con una mayor distancia entre puntos, distancia de hatch y espesor de la capa de polvo. En el caso del espesor de la capa de polvo, como se ha explicado anteriormente, no se puede tomar un valor muy grande ya que esto aumentaría el riesgo de porosidades, por lo que se sigue manteniendo el valor intermedio de 60μm que se había indicado.

La siguiente gráfica muestra esta relación entre la rugosidad (Ra) de las superficies de downskin y la densidad volumétrica de energía (E_v). En este experimento se fija un espesor de capa de 60μm, una frecuencia de barrido de 20kHz, un tiempo de exposición de 25μs, y una distancia entre puntos de 80μm, variando la potencia pico (P_{peak}, W) y la distancia de hatch (h, μm).

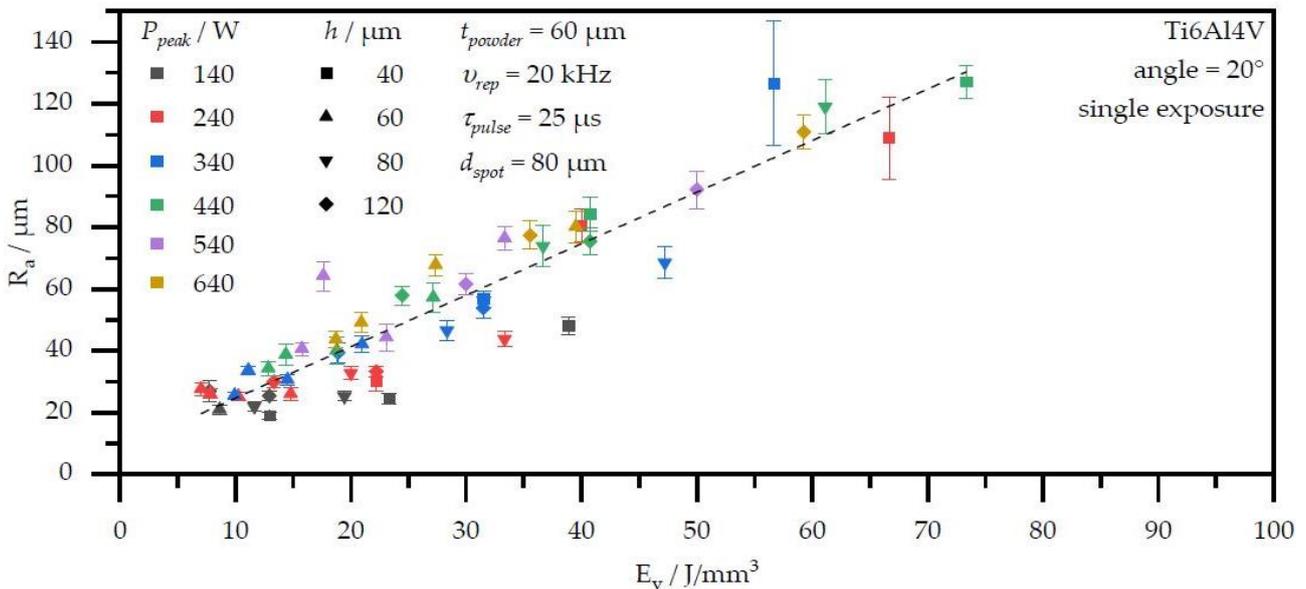


Figura 27. Gráfica mostrando la relación entre Ra de las superficies de downskin y VED [34]

Como se puede observar, de forma general **la rugosidad aumenta al aumentar la densidad volumétrica**. Por tanto, en principio, se debería reducir la potencia del láser y el tiempo de exposición, y aumentar la distancia entre puntos y la distancia de barrido de hatch para disminuir la densidad volumétrica de energía y, por tanto, la rugosidad.

Potencia del láser

La potencia del láser determina directamente la energía que se transmite al polvo metálico. Observando la gráfica de la Figura 27 de R_a se podía deducir que un aumento de la potencia deriva en un aumento de la rugosidad de las superficies de downskin. En el mismo estudio se analizó también la influencia de la potencia de forma independiente, llegando a la misma conclusión: un aumento de la potencia deriva en un aumento de la rugosidad de las superficies de downskin (Figura 28 a).

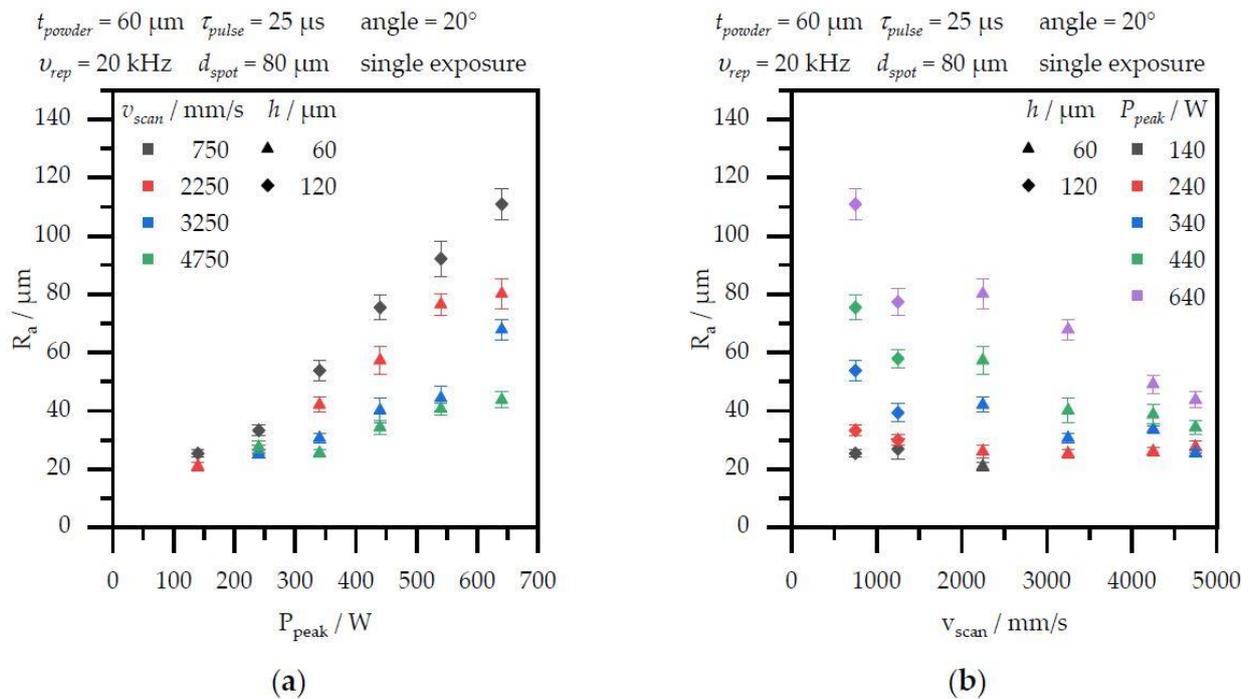


Figura 28. Gráfica mostrando la relación entre R_a de las superficies de downskin y la potencia pico (a) y la relación entre R_a de las superficies de downskin y la velocidad de escaneo (b) [34]

En el experimento, se mide la rugosidad para diferentes valores de potencia, variando también la velocidad de barrido (que está relacionada con la distancia entre puntos y el tiempo de exposición) y con diferentes distancias de hatch. Como se puede observar, los puntos tienen una trayectoria ascendente, lo que indica que un aumento de una de las variables supone un aumento en la otra. De esta manera, **la reducción de la potencia supone una reducción en la rugosidad** de las superficies de downskin.

Velocidad de escaneo

La velocidad de escaneo está directamente relacionada con la distancia entre puntos y el tiempo de exposición. Según la ecuación de la densidad volumétrica de energía, la rugosidad debería disminuir al disminuir el tiempo de exposición y al aumentar la distancia entre puntos. Esto implica que la rugosidad debería también disminuir al aumentar la velocidad de barrido. En la Figura 28 (b) se muestra dicha relación, midiendo la rugosidad para diferentes valores de velocidad, variando también la potencia pico y con diferentes distancias de hatch. En este caso se observa una tendencia descendente, lo que parece indicar que el aumento de una variable deriva en la disminución de la otra. Por tanto, **el aumento de la velocidad de escaneo deriva en una disminución de la rugosidad** de las superficies de downskin.

Esto también se demuestra en el estudio de J.J. Babu et al. [37], en el que se observa que las velocidades más bajas y las potencias más altas resultan en los peores valores de rugosidad de las muestras analizadas.

Densidad linear de energía

El término de densidad linear de energía (LED, Linear Energy Density) representa el ratio entre la potencia y la velocidad de escaneo del láser [27]:

$$LED = \frac{P}{v} \quad (3)$$

Al igual que la densidad volumétrica de energía, este parámetro puede ser utilizado para analizar resultados en cuanto a la rugosidad. En estudios anteriores se ha observado una tendencia descendente de la rugosidad con una menor densidad linear de energía (al igual que con la VED) [35]. Sin embargo, en este experimento de Calignano et al., hay muestras que presentan la misma LED pero rugosidades muy diferentes, por lo que este parámetro debe ser analizado pero no es el único a tener en cuenta, como, en este caso, la distancia de relleno (hatching distance), que es determinante en la calidad de las piezas.

A continuación, se muestra una tabla que recoge la potencia, velocidad de barrido, distancia de hatching, densidad volumétrica y densidad linear de energía utilizados en este experimento.

Tabla 1. Tabla de la potencia, velocidad de barrido, distancia de hatching, densidad volumétrica y densidad linear de energía del experimento de Calignano et al. [35]

	Sample	P (W)	v (mm/s)	h _d (mm)	E _d (J/mm ³)	E _l (J/mm)
Down-skin (2 layers)	1	195	1000	0.05	195.00	0.195
	2	170	1000	0.05	170.00	0.170
	3	195	1000	0.08	121.88	0.195
	4	195	870	0.08	140.09	0.224
	5	170	870	0.08	122.13	0.195
	6	170	1000	0.08	106.25	0.170
	7	170	870	0.05	195.40	0.195
	8	195	870	0.05	224.14	0.224
Supports	-	80	400	-	-	0.200

En este experimento, las muestras 2 y 6 tienen la misma potencia, velocidad de barrido y densidad de energía lineal, pero difieren en la distancia de hatching y en la densidad volumétrica de energía. Mirando estos parámetros, la muestra 6 tiene una mayor distancia de hatching (0,08mm frente a 0,05mm), y una menor densidad volumétrica de energía (106,25 J/mm³ frente a 170,00 J/mm³). La muestra 6 presenta un mejor acabado de la superficie, lo que parece indicar que la rugosidad es menor con una menor densidad volumétrica de energía (como se explicaba anteriormente), y que la rugosidad es menor con una mayor distancia de hatching. Esto se observa en la siguiente imagen de las muestras obtenidas de los experimentos realizados con los parámetros de la Tabla 1. La Figura 29 muestra las 6 muestras que se obtienen de las piezas fabricadas con los parámetros de la tabla anterior, y se puede observar la diferencia de la que se hablaba entre las muestras 2 y 6.

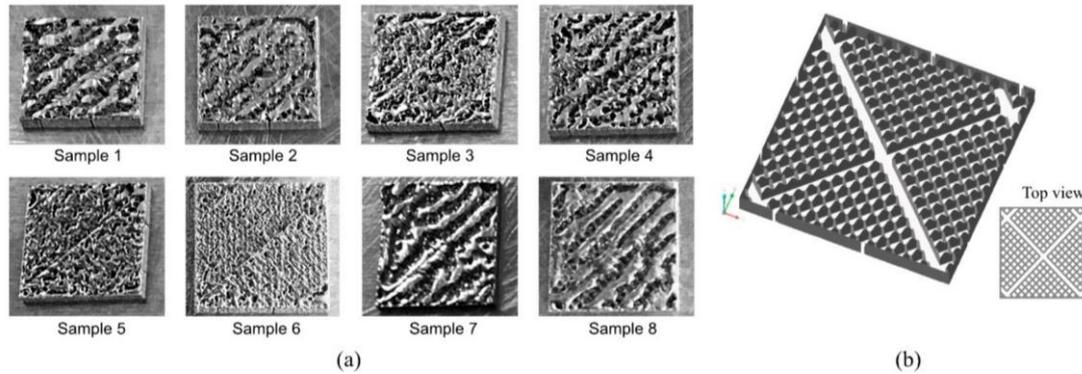


Figura 29. Interfaz entre las estructuras de soporte y la cara inferior de la pieza (a) y estructura de soporte de tipo bloque (b) [35]

Distancia de relleno (hatching distance)

La distancia de relleno o hatching distance es la distancia que hay entre dos trayectorias consecutivas y paralelas en la zona de relleno de la capa de la pieza. Como se explicaba anteriormente, en la Figura 29 se puede observar que el acabado de la muestra 6, teniendo los mismos parámetros de fabricación que la 2 (excepto la distancia de hatching), tiene mucha mejor rugosidad. Esto parece indicar que, **a mayor distancia de hatch, menor es la rugosidad** que tienen las superficies de downskin.

Número de capas de downskin

En apartados anteriores se mostraba de forma general la solución que se propone para reducir la rugosidad en las zonas de downskin. Esto es, modificar los parámetros de fabricación en las capas que están en contacto directo con el polvo, así como de las que están encima de estas (Figura 23). De esta manera, se ha de elegir también el número de capas por encima de la capa de downskin sobre las que se aplican parámetros de downskin. Estas capas son a las que nos referimos con el término de “número de capas de downskin”.

En estudios anteriores se muestra que, de forma general, conviene tomar varias capas por encima de la de downskin para asegurar un mejor acabado superficial de estas superficies. Sin embargo, hay un momento en el que aumentar mucho el número de capas no mejora la calidad, sino que empeora la geometría conseguida. A continuación, se muestran los resultados que Khan et al. obtuvieron sobre esta cuestión.

La Tabla 2 se ha obtenido del estudio realizado por Khan et al. y muestra los parámetros utilizados para fabricar 7 agujeros diferentes, para los cuáles se varía el número de capas de downskin, para dos potencias y manteniendo la velocidad de escaneo. Los resultados obtenidos de los agujeros observados con un microscopio electrónico de barrido se muestran en la Figura 30.

Tabla 2. Tabla de la potencia del láser, velocidad de escaneo y número de capas del experimento de Khan et al. [36]

No	Laser	Speed	Layer
1	65	1000	3
2	65	1000	4
3	65	1000	5
4	65	1000	6
5	150	1000	3
6	150	1000	4
7	150	1000	5

En el experimento se observa que hay una mejora en la precisión de los agujeros debido a que hay una menor formación de escoria al aumentar el número de capas para las que se aplican los parámetros de downskin (imágenes a, b y c). Sin embargo, este aumento excesivo en el número de capas con parámetros de downskin también deriva en un aumento de la porosidad debido a una penetración insuficiente del líquido. Por lo tanto, se debe encontrar un equilibrio entre aplicar los parámetros de downskin en muchas capas para reducir la rugosidad y aplicarlos en menos capas para reducir la porosidad en el material fundido.

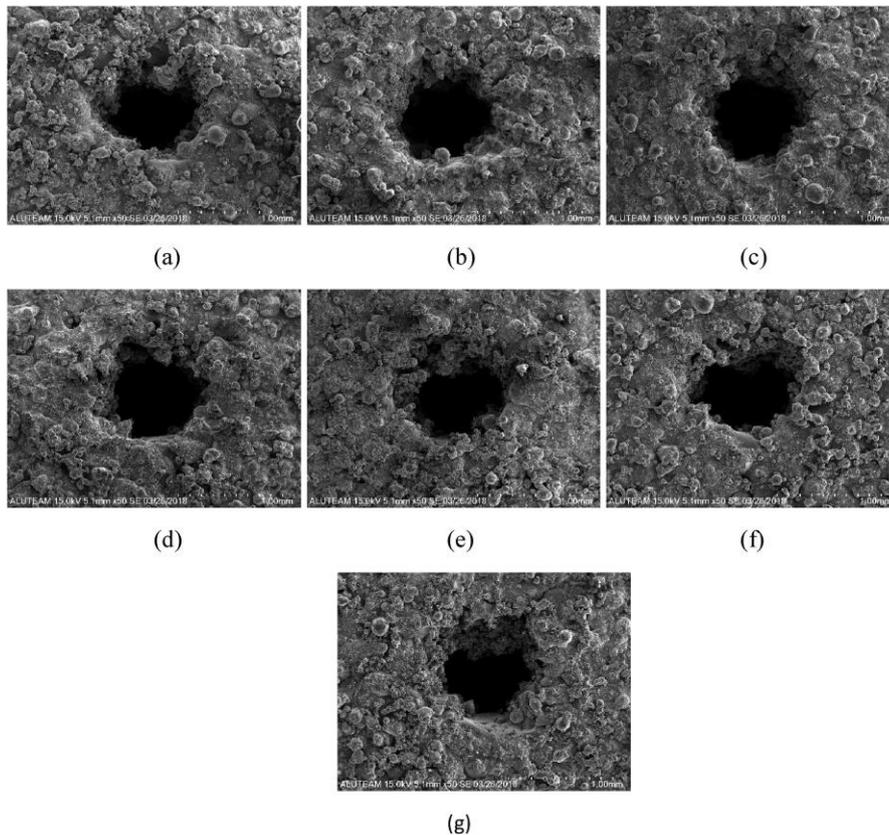


Figura 30. Imágenes SEM de las muestras de la tabla: 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e), 6 (f), 7 (g) [36]

A la vista de las investigaciones realizadas, se puede observar que la problemática de la calidad de las superficies de downskin se ha abordado en diferentes trabajos que analizan el impacto que tienen algunos de los parámetros que intervienen en el proceso. A pesar de que es una tecnología que lleva siendo investigada varios años, todavía no está claro cuál es el mejor procedimiento a seguir para obtener resultados óptimos de las piezas.

Así, se puede observar cómo quedan todavía aspectos por resolver en lo que refiere a la mejora de la calidad de las superficies de downskin en el proceso de fusión láser por lecho de polvo. Por lo tanto, es necesario seguir con las investigaciones teniendo como base todo lo que se ha investigado previamente, para poder avanzar en la mejora de este proceso de fabricación. Uno de los avances tecnológicos más significativos se encuentra en la división de las piezas en diferentes zonas, lo que permite establecer los parámetros óptimos para cada zona, en lugar de los mismos parámetros en todo el volumen. Esto abre un enorme abanico de posibilidades que permitirá mejorar la calidad de las piezas una vez se haya investigado cuáles son los parámetros óptimos para cada zona.

7 Análisis de alternativas

El objetivo principal de este trabajo es la mejora de la calidad de las superficies de downskin mediante la reducción de su rugosidad. La calidad superficial de las piezas viene marcada por una infinidad de factores que intervienen en el proceso. Por ello, se puede modificar la rugosidad de las piezas modificando diferentes factores del proceso. De esta forma, surgen varias alternativas para enfocar el trabajo.

7.1 Softwares de preparación del proceso

Antes de comenzar con la fabricación es necesario preparar el proceso mediante softwares específicos para ello. Las dos alternativas de softwares que se consideran en este proyecto son QuantAM, un software del mismo fabricante que la máquina de fabricación de la que se dispone para esta investigación, y Dyndrite, un software destacado por dar la posibilidad de definir regiones diferentes que facilitan la elección de parámetros de fabricación diferentes para cada zona de la pieza.

7.2 Sistema de distribución de polvo y tipo de polvo

El sistema de distribución de polvo es el encargado de colocar cada capa de polvo sobre la anterior. Habitualmente, se emplea un rodillo que se desplaza de un extremo de la mesa al otro y que empuja el polvo, depositándolo sobre la plataforma con este movimiento. La principal desventaja de este método es que el rodillo distribuye el polvo de una manera no uniforme, quedando mayor densidad de partículas más pequeñas en un extremo y más grandes en el otro. Hay fabricantes que han desarrollado otro tipo de sistemas de distribución sin contacto que evita que se produzca este fenómeno. Uno de estos sistemas de distribución alternativos lo que hace es depositar una capa de polvo gruesa mediante deposición directa desde arriba, y retira el excedente hasta tener el ancho de capa deseado con un sistema de aspiración de polvo.

El tipo de polvo viene definido por la composición metálica del polvo. Con esta tecnología se pueden emplear aleaciones de aluminio, magnesio, titanio, níquel, acero...dependiendo de las propiedades de los componentes a fabricar.

7.3 Parámetros de fabricación

Otra de las alternativas para analizar la variación de la calidad superficial de las piezas es la modificación de los procesos de fabricación, como la potencia del láser, el espesor de la capa de polvo, el ángulo de inclinación de las paredes de las piezas...Todos estos factores intervienen en el resultado final y se pueden modificar y analizar su efecto sobre las piezas para tratar de optimizar el proceso. Para llegar a un resultado óptimo de rugosidad, sería necesario modificar todos los parámetros del proceso y analizar el impacto que tienen sobre la rugosidad, de forma independiente y conjunta. Sin embargo, resulta imposible abordar el problema de esta manera en un único trabajo por lo que se debe analizar el efecto de algunos de ellos para empezar con la investigación, teniendo en mente que es un estudio con vistas de ser continuado en el futuro.

8 Selección de la solución propuesta

Tras analizar todos los caminos alternativos que puede tomar la investigación se llega a una solución para enfocar el trabajo. En cuanto a los softwares de diseño y preparación de la fabricación, se emplea de forma general el de QuantAM ya que Dyndrite es un software más interesante para la separación de la pieza en regiones diferenciadas, pero esta segmentación solo es realmente útil cuando se ha analizado previamente cuáles serían los parámetros óptimos a emplear en cada zona. No obstante, si bien QuantAM es el software que se emplea en el proyecto de forma general, se ha investigado el funcionamiento de Dyndrite de forma paralela para poder emplearlo en el futuro cuando se conozcan los parámetros óptimos para cada región de las piezas.

Tanto el sistema de distribución de polvo como el tipo de polvo influyen en la calidad de las piezas a fabricar. Sería interesante analizar la variación de la rugosidad en función del tipo de sistema de distribución de polvo y la composición del polvo. Sin embargo, esto se encuentra fuera del alcance del trabajo ya que para analizar estos factores habría que tener diferentes máquinas de impresión y esto tendría un coste económico enorme. Por lo tanto, se emplea el sistema de distribución normal de la máquina de Renishaw (sistema de rodillo) y el polvo de Inconel 718 que se emplea de forma habitual en esta tecnología en el CFAA.

Los parámetros de fabricación se pueden variar fácilmente cuando se prepara el proceso de fabricación. Este trabajo se centra en la variación de algunos de los parámetros más relevantes (potencia del láser, distancia entre puntos del haz láser, distancia entre las trayectorias de escaneo...) para ver cómo afectan a la calidad de las piezas dentro de los límites fijados por el alcance del trabajo.

9 Análisis de riesgos

El desarrollo del proyecto asume una serie de riesgos que deben ser evaluados y minimizados en función del impacto y frecuencia que presenten. Los riesgos de este proyecto se pueden separar en riesgos personales, técnicos y medioambientales.

Los riesgos personales tienen que ver con riesgos que afectan directamente a las personas que se encargan de la fabricación de las piezas, así como de su separación de la bandeja de impresión y de los soportes. Estos riesgos son de contacto e inhalación del polvo metálico, que se suelen dar sobre todo al terminar las fabricaciones, así como la aspiración del argón empleado durante la fabricación. Estos riesgos afectarían directamente a la salud de los operarios y deben ser minimizados lo máximo posible con el empleo de equipos de protección y con el mantenimiento de las instalaciones en buen estado para evitar fugas del gas.

Los riesgos técnicos tienen que ver con los resultados de la investigación y con el desarrollo del trabajo. Estos riesgos están relacionados con la dispersión de las medidas de rugosidad tomadas de las piezas fabricadas, con la ausencia de superficies que presenten una buena (o mejor) calidad superficial y con la incompatibilidad de los softwares empleados. La dispersión de los datos no es un riesgo muy importante ya que se suelen tomar medidas de superficies en las que se toman valores de los picos de rugosidades y se realiza la media de todos ellos. Por lo tanto, la dispersión entre medidas no sería determinante en el análisis de los datos al comparar medidas relativas entre piezas para realizar el análisis. En cuanto a la ausencia de superficies con una mejor calidad tampoco se identifica como un problema ya que no es algo que ocurra de forma frecuente. La incompatibilidad de softwares sería un problema ya que podría ralentizar o incluso detener la investigación por lo que se decide emplear dos softwares de forma paralela para evitar depender únicamente de uno de ellos.

Los riesgos medioambientales guardan relación con la contaminación del medioambiente con el polvo metálico sobrante tras una fabricación. Este riesgo es muy frecuente si no se recoge el polvo no fundido y tendría un impacto muy alto en la naturaleza, por lo que se debe evitar recogiendo el polvo de la cama de polvo no fundido y limpiando correctamente todos los elementos empleados durante y al finalizar la fabricación.

La siguiente tabla (Tabla 3) muestra un resumen de los riesgos, juntos con su impacto y frecuencia y las medidas preventivas a tomar (si son necesarias).

Tabla 3. Riesgos del proyecto

Tipo de riesgo	Identificación del riesgo	Impacto	Frecuencia	Acción de intervención - Solución
Personal	Contacto e inhalación del polvo metálico	Alto	Alta	Empleo de EPI durante la extracción de las piezas de la cama de polvo y separación de la plataforma y soportes.
	Aspiración del gas inerte empleado durante la fabricación	Alto	Baja	Buen mantenimiento de los conductos que aportan el gas a la máquina así como un control de los niveles del caudal de dicho gas para evitar fugas.
Técnico	Dispersión de los datos	Medio	Baja	No suele ocurrir que haya dispersión en los datos y además se toman medidas de rugosidad en superficies y no puntos discretos por lo que no es necesario intervenir en este riesgo.
	Ausencia de superficies con buen acabado	Alto	Baja	No observar cambios en las superficies de downskin sería un riesgo muy elevado para el correcto avance del proyecto pero no es un riesgo habitual por lo que no hay que tomar medidas de acción para prevenirlo.
	No compatibilidad del software de Dyndrite con el sistema de Renishaw	Medio	Media	Se trabaja en paralelo con los softwares de Dyndrite y el propio de Renishaw ya que el primero está todavía en desarrollo y no tiene una compatibilidad completa con Renishaw actualmente.
Medioambiental	Deposición de polvo metálico en la naturaleza	Alto	Media	Para evitar que el polvo alcance el medio natural se debe realizar una correcta recogida y reciclado del mismo al finalizar cada fabricación. Para ello se aspira todo el polvo metálico sobrante, que se devuelve al sistema de la máquina y permite volver a emplearlo en próximas fabricaciones.

10 Planificación de la investigación

El proyecto se divide en una serie de fases con unas duraciones y fechas de inicio y fin previstas, que deben ir ajustándose a medida que avanza el proyecto. En un primer lugar el proyecto está centrado en el estudio del proceso que se investiga, para luego poder pasar a los experimentos y el diseño de piezas y procesos de fabricación y el análisis de los resultados. De forma paralela, se debe ir realizando la redacción de toda la documentación correspondiente al TFM para la defensa final del proyecto. A continuación, se muestran las fases del proyecto con sus tareas correspondientes. Solo se tienen en cuenta los días entre semana laborables ya que los fines de semana y los días festivos el CFAA permanece cerrado.

10.1 Fases del proyecto

10.1.1 Fase 1. Estudio del proceso de LPBF y revisión de documentación

Descripción: En primer lugar, se debe realizar un estudio e investigación del proceso general de fusión láser por lecho de polvo para conocer todo lo que se ha realizado en este ámbito hasta el día de hoy. Por otro lado y durante casi todo el proyecto, se debe revisar la documentación de investigaciones previas centradas en las regiones de downskin para partir teniendo dichas investigaciones como punto de inicio y estar al día de cualquier avance que se produzca. Por lo tanto, esta primera fase se divide en dos tareas principales:

- Tarea 1.1: Estudio del proceso de LPBF
 - Duración: 1 semana
 - Inicio: 18 de marzo de 2024
 - Fin: 25 de marzo de 2024
- Tarea 1.2: Revisión de documentación e investigaciones anteriores
 - Duración: 2 meses
 - Inicio: 25 de marzo de 2024
 - Fin: 20 de mayo de 2024

10.1.2 Fase 2. Fabricación de piezas y análisis de resultados

Descripción: Una vez se tiene una visión general del proceso a investigar y se conoce el alcance de estudios anteriores sobre el tema, se pueden realizar experimentos para el avance de esta investigación. Para ello, se diseñan piezas con diferentes geometrías, se fabrican, y se analizan los resultados obtenidos para cada una de ellas mediante la medición de rugosidades y otros parámetros. Por lo tanto, esta segunda fase se puede dividir en cuatro tareas diferentes, correspondientes a cada experimento. Como la duración de cada tarea depende del tamaño y la complejidad de cada pieza, se toman valores medios de duración.

- Tarea 2.1: Experimento 1
 - Duración: 10 días
 - Inicio: 08 de abril de 2024
 - Fin: 17 de abril de 2024
- Tarea 2.2: Experimento 2
 - Duración: 10 días
 - Inicio: 18 de abril de 2024
 - Fin: 29 de abril de 2024

- **Tarea 2.3:** Experimento 3
 - **Duración:** 10 días
 - **Inicio:** 30 de abril de 2024
 - **Fin:** 09 de mayo de 2024
- **Tarea 2.4:** Experimento 4
 - **Duración:** 10 días
 - **Inicio:** 10 de mayo de 2024
 - **Fin:** 21 de mayo de 2024

Hay que recordar que la duración de las tareas hace referencia a la duración en la que se ha trabajado (de lunes a viernes), pero que las fechas de inicio y fin tienen en cuenta también los fines de semana y los días festivos.

10.1.3 Fase 3. Estudio y diseño de un proceso de fabricación con Dyndrite

Descripción: Dyndrite es un software de diseño del proceso de fusión láser por lecho de polvo muy interesante que permite, entre otras cosas, definir regiones volumétricas en una misma pieza. Esto ayuda a la hora de establecer los parámetros óptimos para cada geometría. Esta tercera tarea del trabajo consiste en aprender a usar el software de Dyndrite para ver todas las opciones que ofrece. Es un programa que será muy útil en futuras investigaciones, pero en este trabajo primero se debe mejorar la calidad en las superficies de downskin para ver qué parámetros interesa más emplear en cada región.

- **Tarea 3.1:** Estudio del software de Dyndrite
 - **Duración:** 1 mes
 - **Inicio:** 08 de abril de 2024
 - **Fin:** 08 de mayo de 2024

10.1.4 Fase 4. Documentación y presentación TFM

Descripción: De forma paralela con la investigación y experimentación se debe ir preparando toda la documentación necesaria para la entrega del TFM. Esto es la redacción de la memoria del TFM y la presentación que debe exponerse tras la entrega de la parte escrita. Por ello, esta cuarta fase se divide en dos tareas principales:

- **Tarea 4.1:** Redacción de la memoria del TFM
Esta tarea se lleva a cabo durante casi toda la investigación.
 - **Duración:** 2 meses y medio
 - **Inicio:** 20 de marzo de 2024
 - **Fin:** 03 de junio de 2024
- **Tarea 4.2:** Preparación de la presentación del TFM
Esta tarea se lleva a cabo al final del proyecto, una vez se haya entregado la memoria.
 - **Duración:** 2 meses y medio
 - **Inicio:** 10 de junio de 2024
 - **Fin:** 21 de junio de 2024

Las fases y tareas explicadas en este apartado muestran una planificación del proyecto que se ha ido modificando a lo largo de su desarrollo ya que al inicio del mismo no se conocían todos los detalles de las tareas que se iban a realizar, el tiempo que iba a llevar cada tarea, los días que se iban a dedicar a cada fase...

10.2 Diagrama de Gantt

Conociendo todas las tareas y sus respectivas duraciones, es posible mostrarlas en un diagrama de Gantt y visualizar así de forma clara la planificación del proyecto.

En la página siguiente, se muestra el diagrama de Gantt del proyecto con las fechas de inicio y fin de cada tarea. Los días marcados en verde corresponden a los días en los que no se acudió al CFAA por vacaciones de Semana Santa (por lo que se pudo trabajar en la revisión de investigaciones anteriores y en la redacción del TFM, pero no en las tareas que requerían estar de forma presencial como el diseño de las piezas o el estudio del software de Dyndrite).

Análisis de parámetros de downskin y support-free structures en el proceso de Laser Powder Bed Fusion

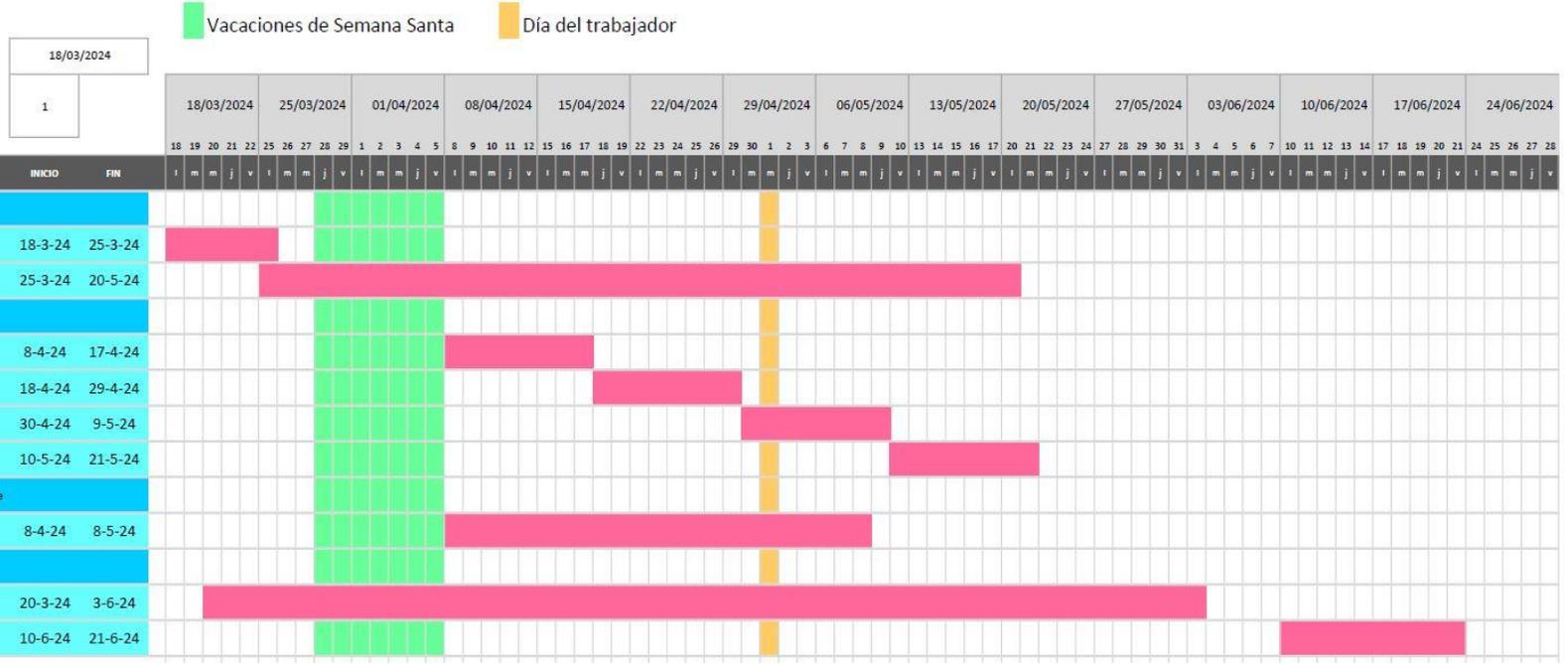


Figura 31. Diagrama de Gantt

11 Desarrollo experimental

La parte experimental de este proyecto se centra en el empleo de diferentes softwares de preparación del proceso de fusión láser por lecho de polvo como Dyndrite y QuantAM (de Renishaw) para definir regiones dentro de las piezas sobre las que aplicar parámetros de downskin para mejorar su rugosidad en estas zonas críticas.

Se realizan varios experimentos en búsqueda de la optimización de los parámetros de downskin. El primer experimento se centra en los parámetros de potencia del láser, el modo del haz láser y velocidad de escaneo. La optimización del resto de parámetros (número de bordes, número de capas de downskin, distancia entre bordes, altura de capa, hatching (relleno)... se realiza en los siguientes experimentos.

11.1 Experimento 1: Arco circular

El primer experimento consiste en la fabricación de una pieza con forma de arco en la que se desea mejorar la rugosidad en las zonas de downskin. Se elige esta geometría debido a que se pasa de un ángulo de 90° con respecto a la horizontal o un ángulo de 0°, siendo los ángulos más pequeños los más críticos en los problemas de downskin.

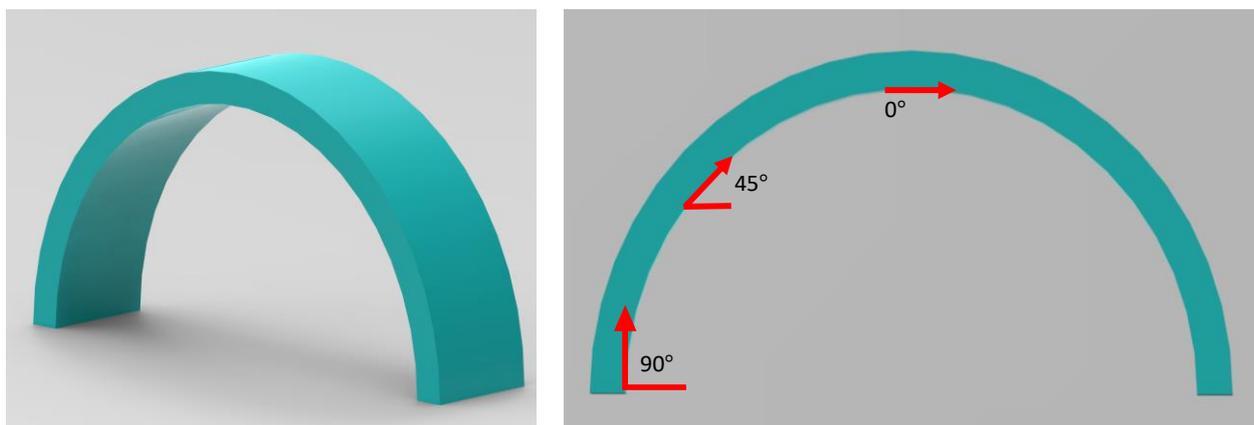


Figura 32. Geometría de la pieza con forma de arco del experimento 1

Los parámetros analizados son potencia, distancia entre puntos, tiempo de exposición, número de exposiciones (número de veces que el láser dibuja una misma trayectoria en cada capa), número de capas (número de capas de downskin), distancia de bordes/contorno, distancia de hatch en las regiones de downskin, densidad volumétrica de energía, densidad lineal de energía y velocidad de barrido. En este primer experimento, se mantienen constantes el tiempo de exposición (ET), el número de exposiciones (NE), el número de capas (NL), la distancia de contorno/borde (CD), y la distancia de hatch en las zonas de downskin (DH). Los parámetros que se varían en cada muestra son la potencia (P), la distancia entre puntos (PD), y la velocidad de escaneo (SS), obteniendo de esta manera diferentes valores de densidad volumétrica de energía (VED) y densidad lineal de energía (LED).

La densidad volumétrica de energía se calcula a partir de la expresión de la ecuación (4), con un ancho de capa de 60 μm:

$$VED = \frac{P \cdot ET}{PD \cdot CD \cdot LT} \quad (4)$$

La densidad linear de energía se calcula a partir de la expresión de la ecuación (5):

$$LED = \frac{P}{S} \quad (5)$$

La velocidad de escaneo (SS: Scanning Speed) se calcula a partir de la distancia entre puntos y el tiempo de exposición:

$$SS = \frac{PD}{ET} \quad (6)$$

Por lo tanto, la ecuación de densidad linear de energía se asemeja a la de la densidad volumétrica de energía, pero sin tener en cuenta la distancia de borde/contorno ni el grosor de la capa de polvo:

$$LED = \frac{P}{PD/ET} = \frac{P \cdot ET}{PD} \rightarrow VED = \frac{LED}{CD \cdot LT} \quad (7)$$

La Tabla 4 recoge los parámetros empleados para cada muestra, así como los valores de VED y LED calculados a partir de dichos parámetros. Los nombres identificativos de cada muestra son un número (en orden, del 1 al 16), aumentando la potencia de 50 a 400 W y la velocidad de escaneo de 150 a 1500 mm/s. En la columna de Ref., la C y P indican el modo del haz láser: C, continuo; P, pulsado.

Tabla 4. Parámetros del experimento 1

Ref.	P [W]	PD [μm]	ET [μs]	NE	NL	CD [μm]	DH [μm]	VED [J/mm ³]	LED [J/mm]	SS [mm/s]
1C / 1P	50	3	20	1	3	45	45	123.456	0.333	150
2C / 2P	100	7	20	1	3	45	45	105.820	0.285	350
3C / 3P	150	11	20	1	3	45	45	101.010	0.272	550
4C / 4P	200	15	20	1	3	45	45	98.765	0.266	750
5C / 5P	250	19	20	1	3	45	45	97.465	0.263	950
6C / 6P	300	22	20	1	3	45	45	101.010	0.272	1100
7C / 7P	350	26	20	1	3	45	45	99.715	0.269	1300
8C / 8P	400	30	20	1	3	45	45	98.765	0.266	1500
9C / 9P	50	2	20	1	3	45	45	185.185	0.500	100
10C / 10P	100	5	20	1	3	45	45	148.148	0.400	250
11C / 11P	150	7	20	1	3	45	45	158.730	0.428	350
12C / 12P	200	10	20	1	3	45	45	148.148	0.400	500
13C / 13P	250	12	20	1	3	45	45	154.320	0.416	600
14C / 14P	300	15	20	1	3	45	45	148.148	0.400	750
15C / 15P	350	17	20	1	3	45	45	152.505	0.411	850
16C / 16P	400	20	20	1	3	45	45	148.148	0.400	1000

P: Power [W], **PD:** Point Distance [μm], **ET:** Exposure Time [μs], **NE:** Number of Exposures, **NL:** Number of Layers, **CD:** Border / Contour Distance [μm], **DH:** Downskin Hatch Distance [μm], **VED:** Volumetric energy density [J/mm³], **LED:** Linear energy density [J/mm], **SS:** scanning speed [mm/s].

La Figura 33 representa las muestras colocadas sobre la mesa de impresión en el software de QuantAM antes de comenzar con el proceso de fabricación. Además de colocar las 32 muestras, también se añaden unos soportes (Figura 34) en la base del arco a ambos lados para ayudar a la transmisión del calor y facilitar la separación de las pesas de la mesa (porque hay menos superficie de contacto).

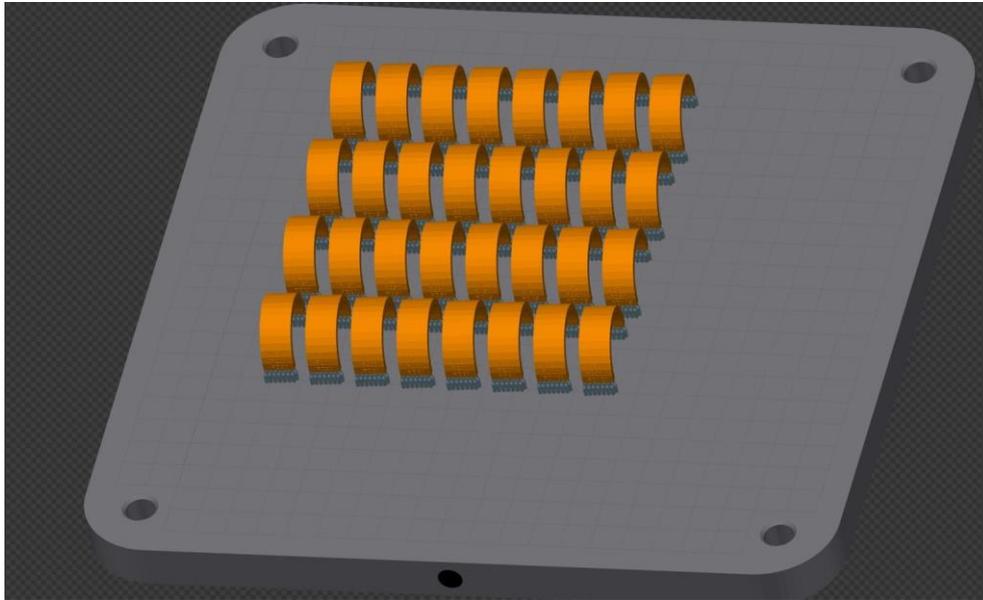


Figura 33. Muestras colocadas sobre la mesa de impresión (experimento 1)

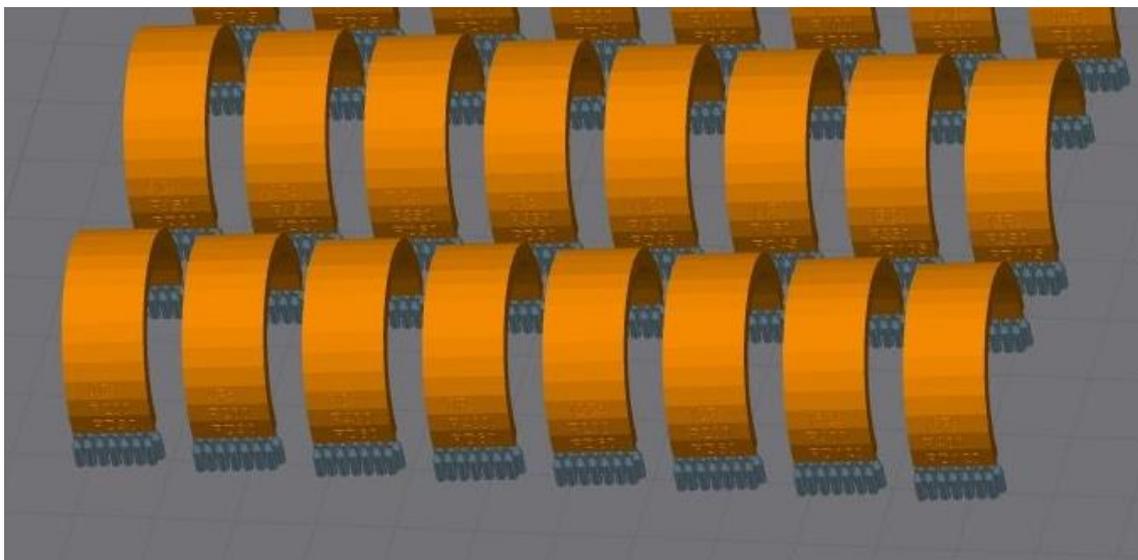


Figura 34. Imagen detalle de los soportes en los arcos (experimento 1)

11.1.1 Análisis de resultados (experimento 1)

Al finalizar el primer experimento se obtienen 32 muestras (16 con el modo pulsado y 16 con el modo continuo). Las 32 muestras observadas desde arriba una vez retirado todo el polvo metálico no fundido al terminar de fabricarlas aparecen en la Figura 35. A simple vista, en las regiones de upskin, todas las piezas tienen un acabado superficial muy similar.

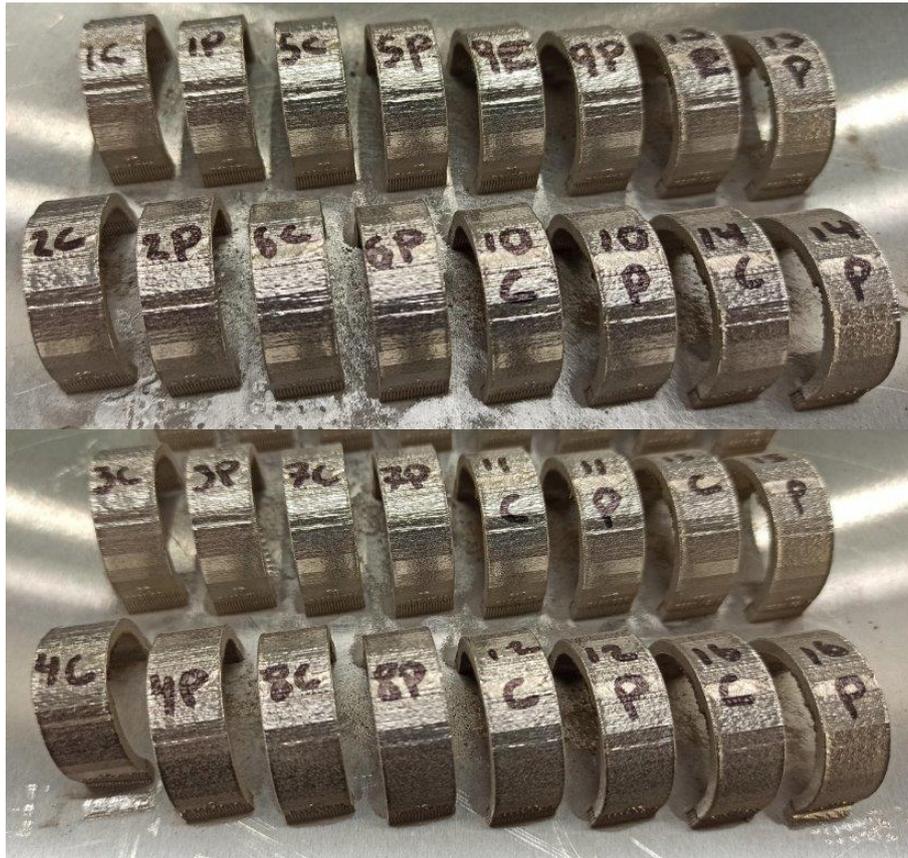


Figura 35. Muestras vistas desde arriba (experimento 1)

Observando las muestras por debajo (Figura 36), se ve que se han empleado densidades de energía muy elevadas ya que todos los componentes presentan material quemado justo en el centro del arco y tienen una rugosidad muy alta debido a todo el material que se ha adherido por la transmisión de la energía del láser hacia el polvo metálico.

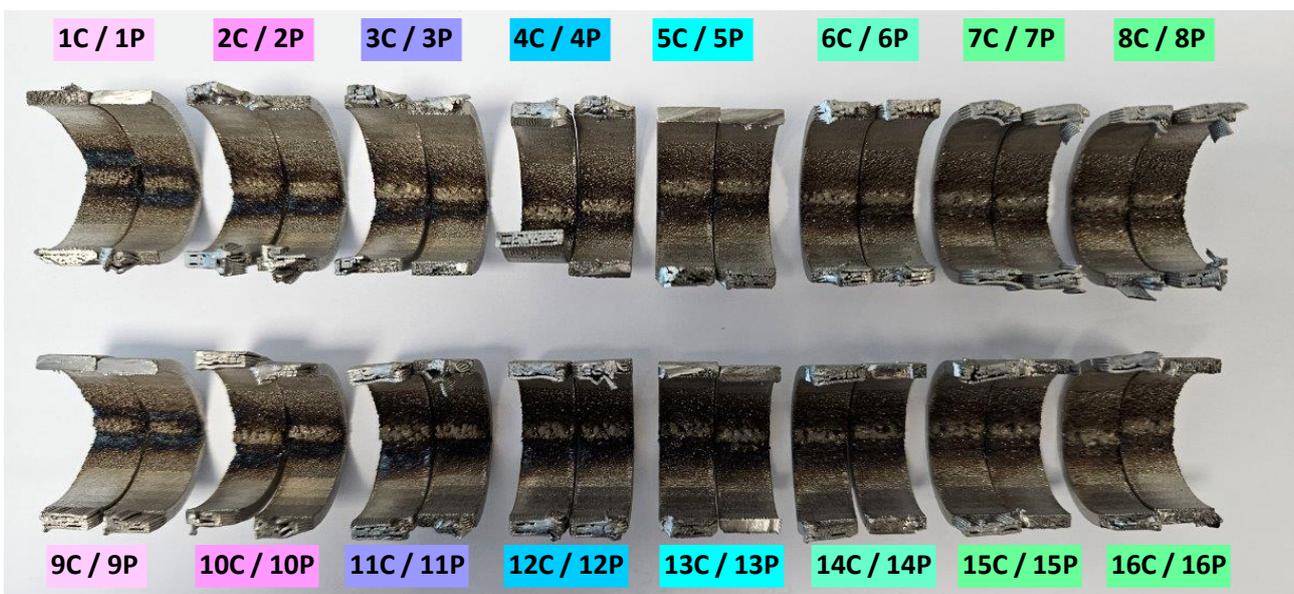


Figura 36. Regiones de downskin de las muestras del experimento 1

Además de esto, si se comparan unas de las muestras con una densidad de energía volumétrica de 100 J/mm^3 (muestras 7 y 8) con unas de 150 J/mm^3 (muestras 15 y 16) con los mismos valores de potencia respectivamente (las mismas potencias las muestras 7 y 15, y las muestras 8 y 16), se ve que aquellas con menor densidad de energía tienen un acabado superficial algo mejor en la región de downskin y una línea central de material sobrecalentado más pequeña (Figura 37).

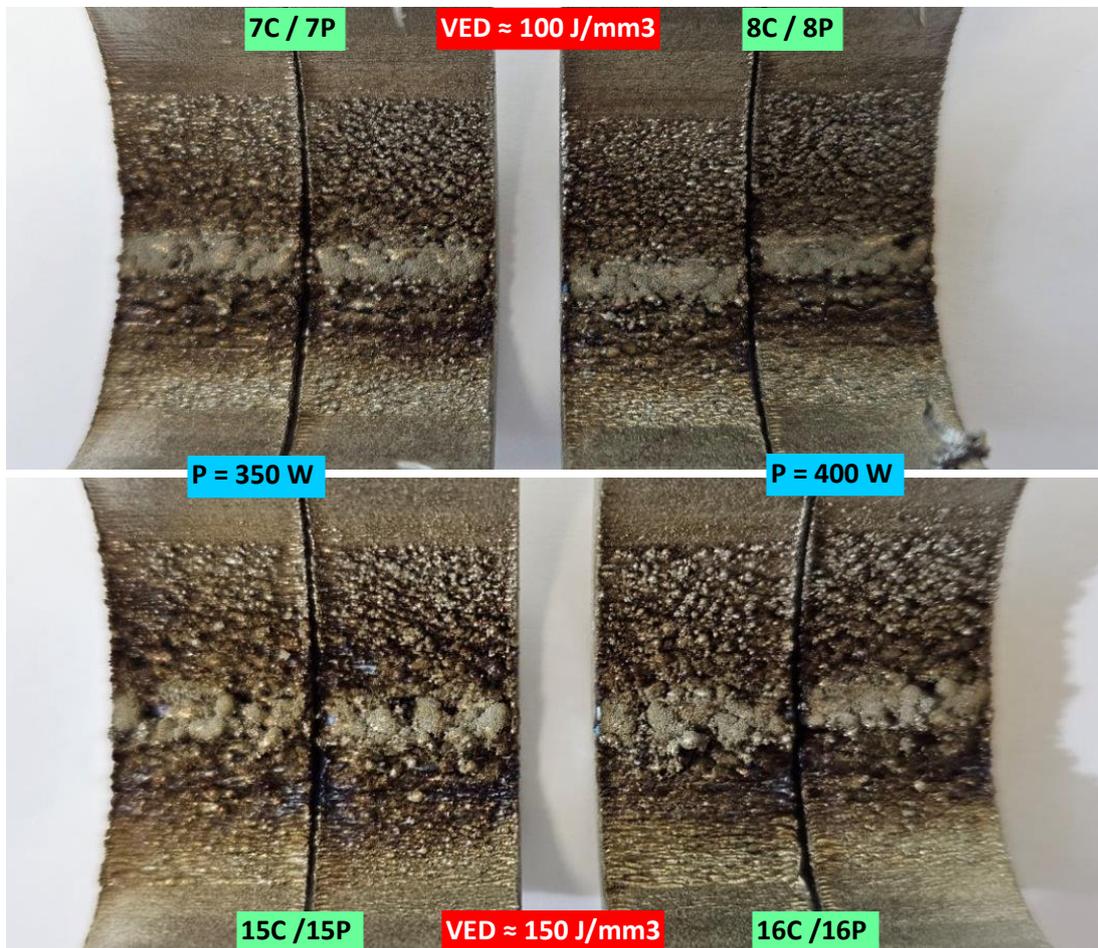


Figura 37. Imagen detalle de las muestras 7, 8, 15 y 16 vistas desde abajo (experimento 1)

Por lo tanto, este primer experimento parece indicar que se pueden conseguir mejores acabados en las piezas si se reduce la densidad volumétrica de energía. Para ello, se debe variar alguno de los parámetros que la definen y estudiar el efecto que tiene. En el siguiente experimento se fabrican las mismas piezas modificando también la distancia entre puntos del láser (utilizando distancias mayores) y, por tanto, cambiando la velocidad de escaneo del láser (velocidades mayores). Esto significa que en este segundo experimento se utilizan densidades de energía volumétricas menores y se espera que la rugosidad de las piezas obtenidas disminuya.

11.2 Experimento 2: Arco circular y menor VED

En el segundo experimento se fabrica la misma geometría que en el primero. En él se emplean los mismos valores de P (potencia, de 50 a 400W), ET (tiempo de exposición, 20 μ s), NE (número de exposiciones, 1), NL (número de capas, 3), CD (distancia de contorno/borde, 45 μ m), HD (distancia de hatch, 45 μ m) y LT (grosor de la capa de polvo, 60 μ m) que en el primer experimento. De forma general, se emplean valores mayores de PD (distancia entre puntos, se fijan valores crecientes con la potencia, de 7 a 90 μ m). Por ello, las velocidades de escaneo son también mayores, y las densidades de energía volumétricas y lineales son menores. Al disminuir la densidad de energía, se espera que la rugosidad en las zonas de downskin de las muestras de este segundo experimento disminuya.

La Tabla 5 recoge los parámetros empleados para cada muestra, así como los valores de VED y LED calculados a partir de dichos parámetros. Los nombres identificativos de cada muestra son un número (en orden, del 1 al 16), aumentando la potencia de 50 a 400 W y la velocidad de escaneo de 350 a 3000 mm/s. En la columna de Ref., la C y P indican el modo del haz láser: C, continuo; P, pulsado.

Tabla 5. Parámetros del experimento 2

Ref.	P [W]	PD [μ m]	ET [μ s]	NE	NL	CD [μ m]	DH [μ m]	VED [J/mm^3]	LED [J/mm]	SS [mm/s]
1C / 1P	50	7	20	1	3	45	45	52.91	0.14	350
2C / 2P	100	15	20	1	3	45	45	49.38	0.13	750
3C / 3P	150	20	20	1	3	45	45	55.55	0.15	1000
4C / 4P	200	30	20	1	3	45	45	49.38	0.13	1500
5C / 5P	250	35	20	1	3	45	45	52.91	0.14	1750
6C / 6P	300	40	20	1	3	45	45	55.55	0.15	2000
7C / 7P	350	50	20	1	3	45	45	51.85	0.14	2500
8C / 8P	400	60	20	1	3	45	45	49.38	0.13	3000
9C / 9P	50	15	20	1	3	45	45	24.69	0.06	750
10C / 10P	100	30	20	1	3	45	45	24.69	0.06	1500
11C / 11P	150	45	20	1	3	45	45	24.69	0.06	2250
12C / 12P	200	60	20	1	3	45	45	24.69	0.06	3000
13C / 13P	250	75	20	1	3	45	45	24.69	0.06	3750
14C / 14P	300	90	20	1	3	45	45	24.69	0.06	4500
15C / 15P	350	105	20	1	3	45	45	24.69	0.06	5250
16C / 16P	400	120	20	1	3	45	45	24.69	0.06	6000

P: Power [W], **PD:** Point Distance [μ m], **ET:** Exposure Time [μ s], **NE:** Number of Exposures, **NL:** Number of Layers, **CD:** Border / Contour Distance [μ m], **DH:** Downskin Hatch Distance [μ m], **VED:** Volumetric energy density [J/mm^3], **LED:** Linear energy density [J/mm], **SS:** scanning speed [mm/s].

11.2.1 Análisis de resultados (experimento 2)

Al finalizar el segundo experimento se obtienen de nuevo 32 muestras (16 con el modo pulsado y 16 con el modo continuo). Las 32 muestras observadas desde arriba y colocadas sobre la mesa de impresión una vez retirado todo el polvo metálico no fundido aparecen en la Figura 38.

A simple vista, en las regiones de upskin, todas las piezas tienen un acabado superficial muy similar. Además, si comparamos estas muestras con las del experimento 1 (Figura 35), se puede observar una mejora en el acabado superficial consiguiendo piezas con perfiles más suaves y menos rugosidad.

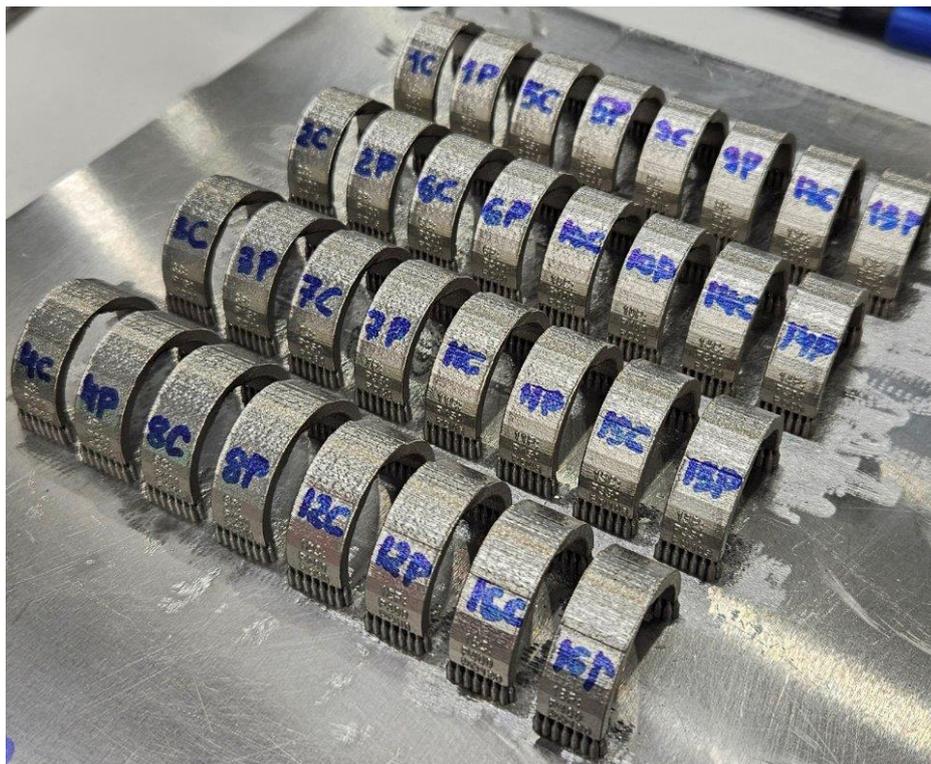


Figura 38. Muestras vistas desde arriba (experimento 2)

En las regiones de downskin (Figura 39) también se observa una mejora de la calidad superficial en comparación con el experimento 1. Utilizando unos valores de VED más pequeños, la rugosidad es menor y menos polvo metálico se adhiere a las regiones de downskin.

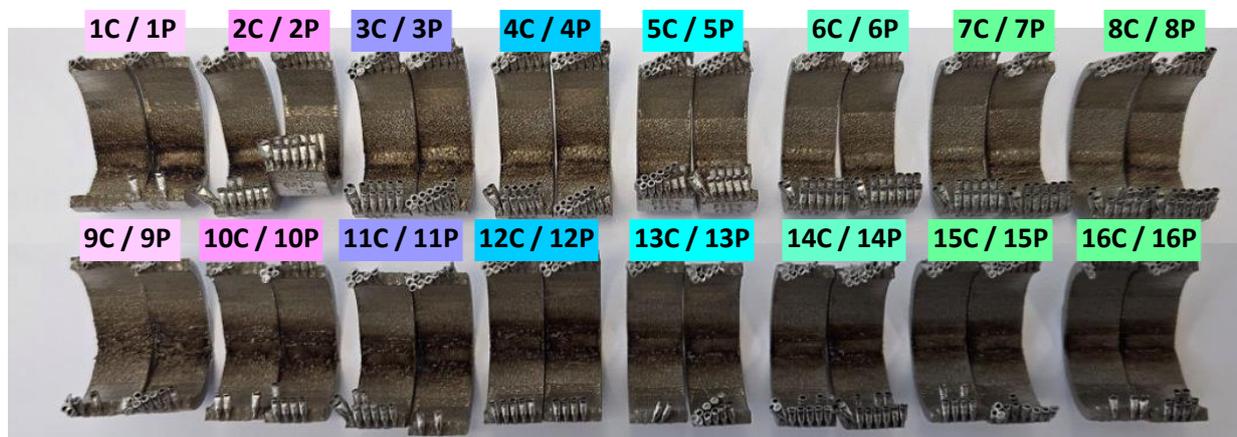


Figura 39. Regiones de downskin de las muestras del experimento 2

Por otro lado, si se comparan unas de las muestras con una densidad de energía volumétrica de 50 J/mm^3 (muestras 7 y 8) con unas de 25 J/mm^3 (muestras 15 y 16) con los mismos valores de potencia respectivamente (las muestras 7 y 15, la 8 y 16), se ve que aquellas con menor densidad de energía tienen menor rugosidad, pero también presentan una franja a cada lado del centro del arco en el que el material se ha quemado (Figura 40). Esto podría ser porque se están usando velocidades de barrido tan altas que no se llega a fundir bien el material y el calor del láser se transmite a las capas que ya se han fundido recalentándose más de lo debido.

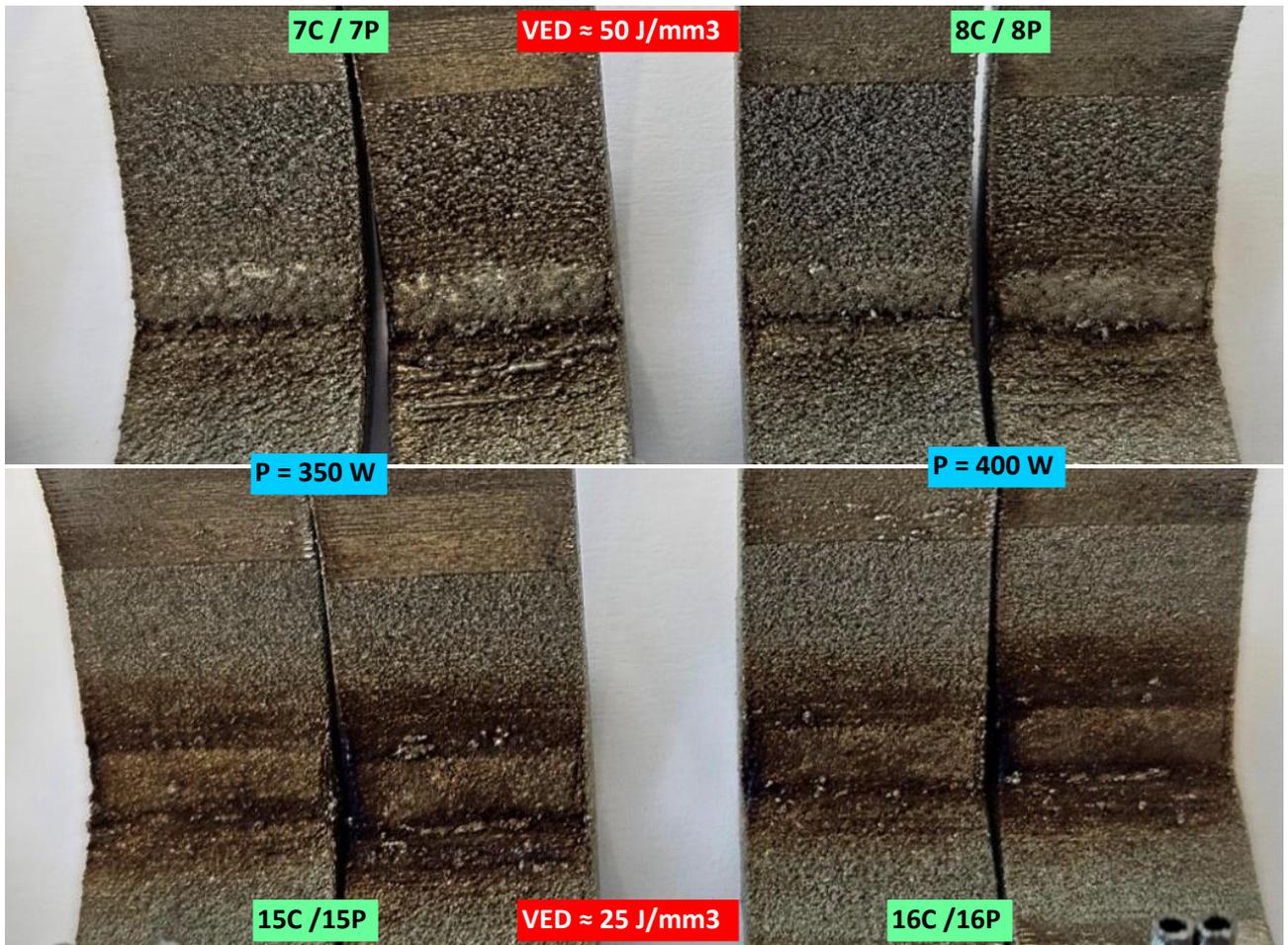


Figura 40. Imagen detalle de las muestras 7, 8, 15 y 16 vistas desde abajo (experimento 2)

Si analizamos cuatro muestras de estos dos primeros experimentos en las cuales se han empleado las mismas potencias (400 W), pero con diferentes distancias entre puntos (PD) en cada una de ellas, se puede observar que, a medida que se disminuye la densidad de energía volumétrica, las piezas presentan menor rugosidad (Figura 41). La Tabla 6 muestra un resumen de los parámetros empleados en estas cuatro muestras. En ella se muestran estos valores crecientes de distancia entre puntos y velocidad, y los valores decrecientes de densidades de energía.

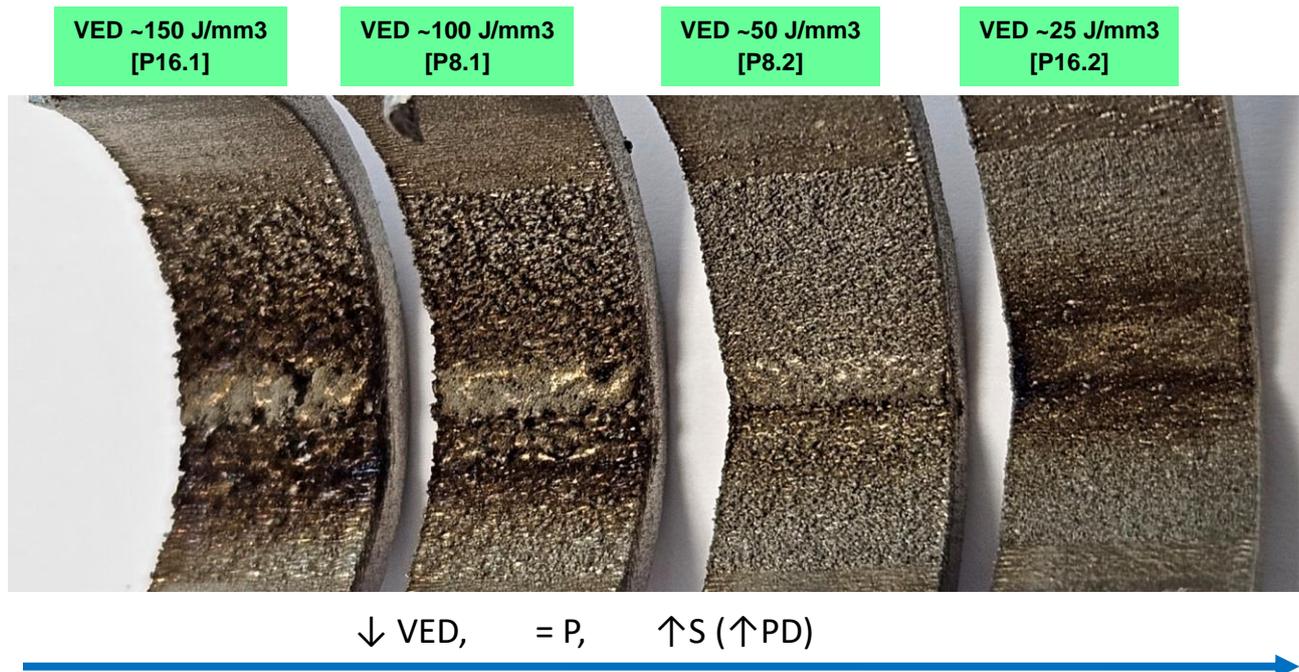


Figura 41. Cuatro muestras con cuadro densidades volumétricas de energía (misma potencia, distinta distancia entre puntos)

Tabla 6. Tabla resumen de los parámetros de cuatro muestras de los experimentos 1 y 2

Ref.	P [W]	PD [μm]	ET [μs]	NE	NL	CD [μm]	DH [μm]	VED [J/mm ³]	LED [J/mm]	SS [mm/s]
P16.1	400	20	20	1	3	45	45	148.148	0.400	1000
P8.1		30						98.765	0.266	1500
P8.2		60						49.380	0.130	3000
P16.2		120						24.690	0.060	6000

P: Power [W], **PD:** Point Distance [μm], **ET:** Exposure Time [μs], **NE:** Number of Exposures, **NL:** Number of Layers, **CD:** Border / Contour Distance [μm], **DH:** Downskin Hatch Distance [μm], **VED:** Volumetric energy density [J/mm³], **LED:** Linear energy density [J/mm], **SS:** scanning speed [mm/s].

Por otro lado, analizando estas mismas 4 muestras vistas de perfil se puede ver que aparece también mayor distorsión de su geometría (Figura 42) a medida que disminuyen las densidades de energía. Estos defectos en la geometría están relacionados con la aparición de estreses térmicos durante la fabricación del proceso, que deforman cada lado del arco antes de unirlo en el punto central. Por lo tanto, este defecto que aparece por el diseño de las muestras compromete el estudio de diseño y conviene realizar un experimento con una geometría continua en lugar de tener un arco que se va formando por cada lado y se une en un punto central como es el caso de los dos primeros experimentos.

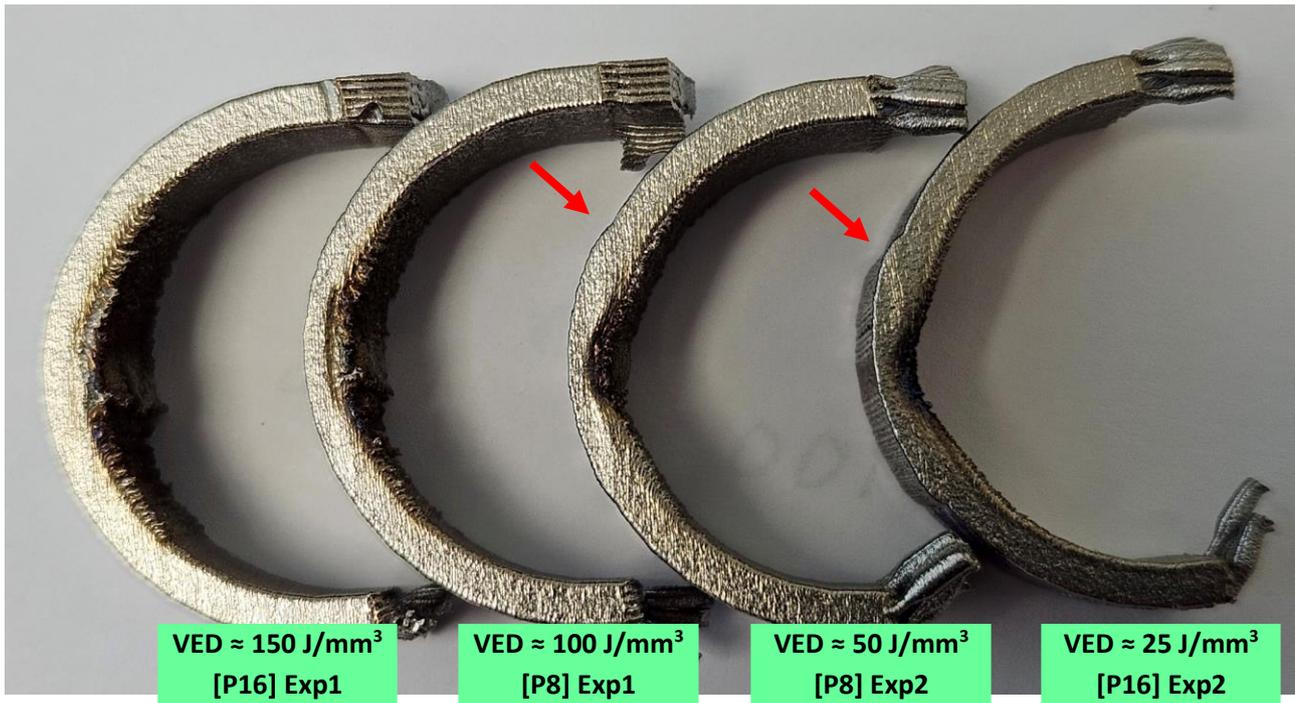


Figura 42. Defecto de unión de cuatro muestras con cuatro densidades volumétricas de energía (misma potencia)

11.3 Experimento 3: Semiesfera y cilindro con aletas

En el tercer experimento se fabrican dos geometrías diferentes para analizar más de un parámetro en un mismo experimento: una semiesfera hueca con la pared de cierto grosor (Figura 43 a), y un cilindro con aletas de diferentes inclinaciones (Figura 43 b), para observar cómo influye el ángulo de inclinación respecto de la horizontal de las superficies de downskin en la rugosidad.

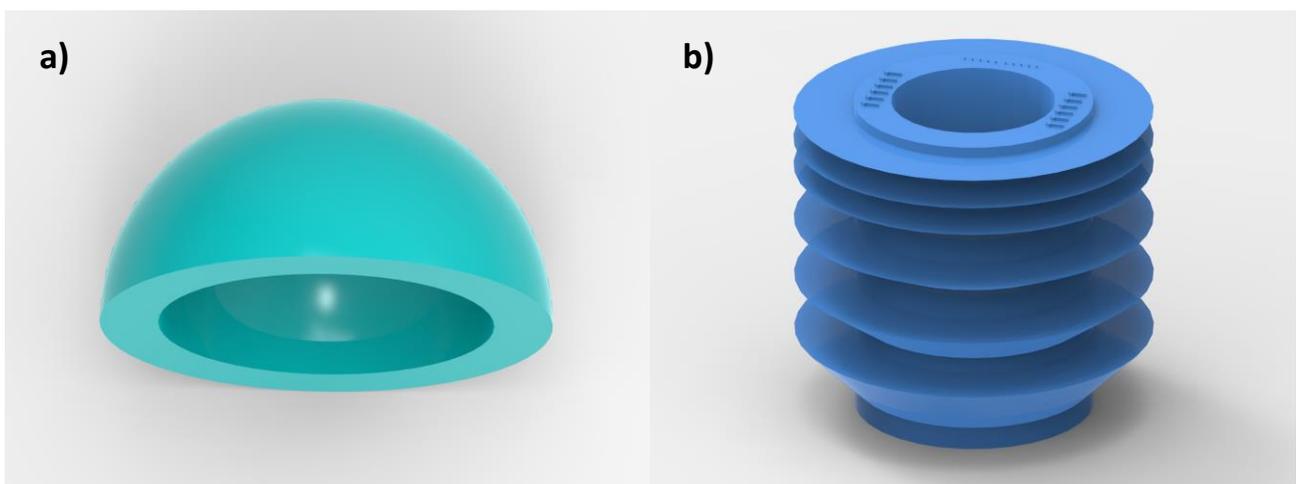


Figura 43. Modelo 3D de las dos piezas del experimento 3: semiesfera (a), cilindro con aletas (b)

En la Tabla 7 se muestran los parámetros empleados para fabricar 8 muestras de la semiesfera (4 primeras parejas de muestras) y 8 muestras del cilindro con las aletas inclinadas (4 últimas parejas de muestras). En este experimento se intenta analizar la influencia de la densidad de energía, modificada con la distancia entre puntos y manteniendo el resto de parámetros constantes. Se emplean unas geometrías más adecuadas para este proceso ya que el arco de los dos primeros experimentos daba lugar a defectos geométricos en la unión de cada “pata”.

Tabla 7. Parámetros del experimento 3

Ref.	P [W]	PD [μm]	ET [μs]	NE	NL	CD [μm]	DH [μm]	VED [J/mm^3]	LED [J/mm]	SS [mm/s]
1C / 1P	400	20	20	1	3	45	45	148.148	0.400	1000
2C / 2P	400	30	20	1	3	45	45	98.765	0.266	1500
3C / 3P	400	60	20	1	3	45	45	49.380	0.130	3000
4C / 4P	400	120	20	1	3	45	45	24.690	0.060	6000
5C / 5P	400	20	20	1	3	45	45	148.148	0.400	1000
6C / 6P	400	30	20	1	3	45	45	98.765	0.266	1500
7C / 7P	400	60	20	1	3	45	45	49.380	0.130	3000
8C / 8P	400	120	20	1	3	45	45	24.690	0.060	6000

P: Power [W], **PD:** Point Distance [μm], **ET:** Exposure Time [μs], **NE:** Number of Exposures, **NL:** Number of Layers, **CD:** Border / Contour Distance [μm], **DH:** Downskin Hatch Distance [μm], **VED:** Volumetric energy density [J/mm^3], **LED:** Linear energy density [J/mm], **SS:** scanning speed [mm/s].

La Figura 44 representa las muestras colocadas sobre la mesa de impresión en el software de QuantAM antes de comenzar con el proceso de fabricación.

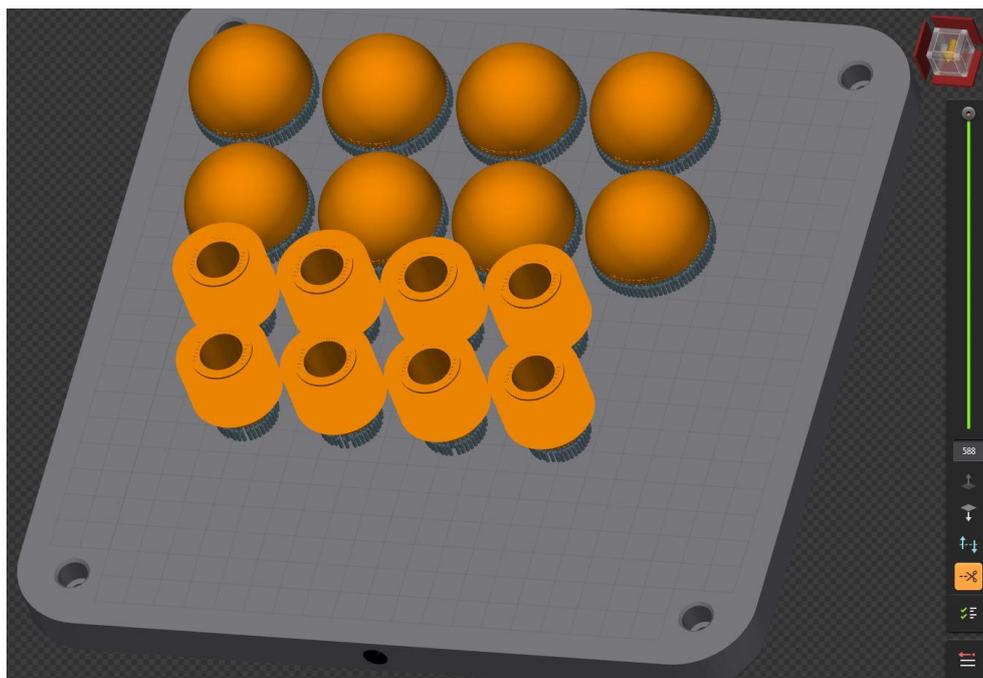


Figura 44. Muestras colocadas sobre la mesa de impresión (experimento 3)

11.3.1 Análisis de resultados (experimento 3)

Al finalizar el tercer experimento se obtienen 16 muestras (8 de la semiesfera y 8 del cilindro con las aletas inclinadas). Las 16 muestras observadas desde arriba y colocadas sobre la mesa de impresión una vez retirado todo el polvo metálico no fundido aparecen en la Figura 45.



Figura 45. Muestras vistas desde arriba (experimento 3)

Como se han empleado dos geometrías diferentes en este experimento, se analizan los resultados de cada una por separado. En primer lugar, nos centramos en la semiesfera.

11.3.1.1 Semiesfera

En las muestras con forma de semiesfera se puede observar claramente el círculo que define el área en el que se han aplicado los parámetros de downskin (ver Figura 46).



Figura 46. Muestra 3P con la región de downskin marcada con una circunferencia

En estas geometrías nos centraremos en estas regiones para el análisis puesto que es aquí donde se han variado los parámetros de fabricación para analizar el efecto de la distancia entre puntos (y, por tanto, de la densidad de energía) en los resultados de calidad superficial obtenidos. En la siguiente imagen (Figura 47) se muestran las 8 semiesferas obtenidas, ordenadas de mayor a menor densidad de energía volumétrica.

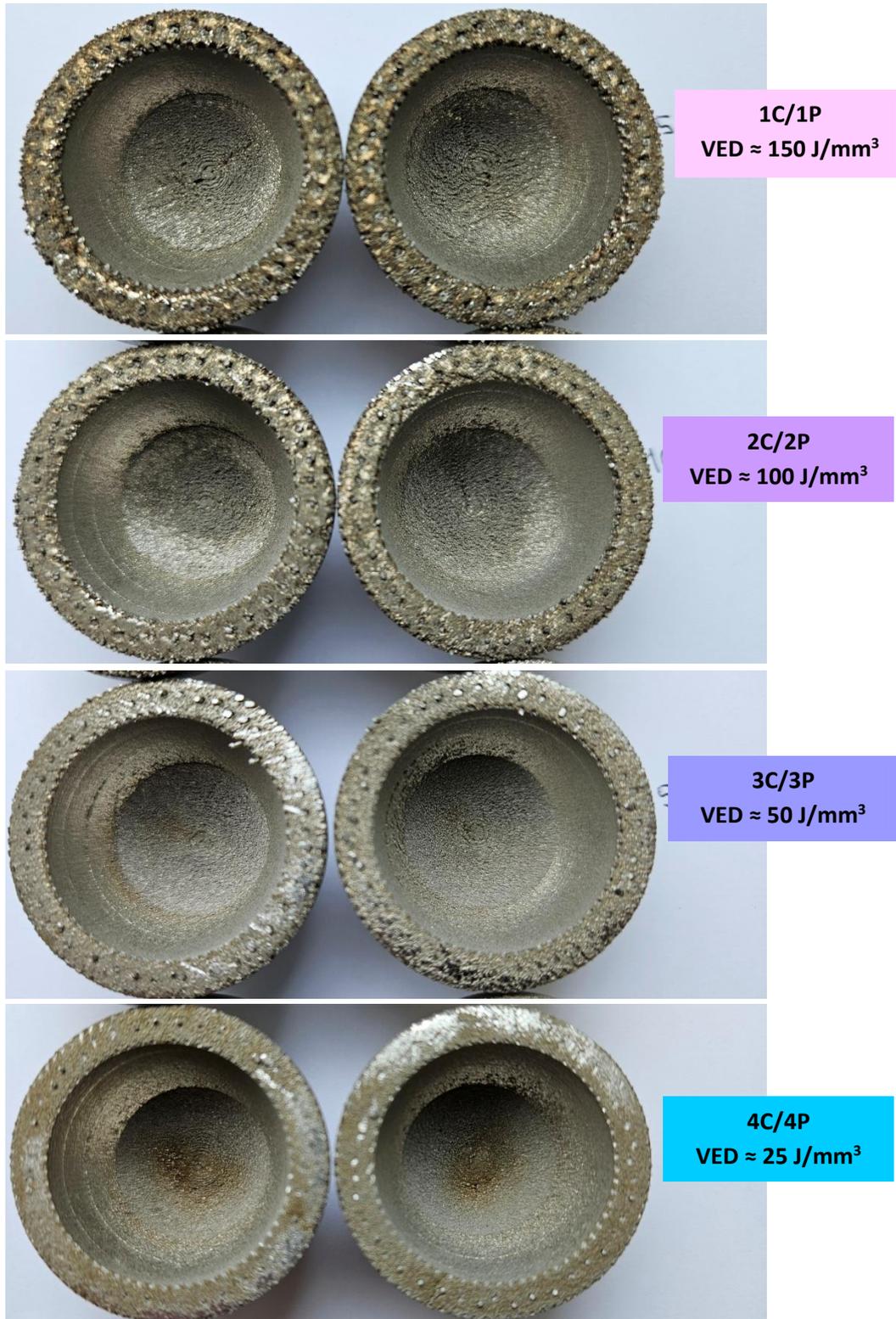


Figura 47. Regiones de downskin de las muestras semiesféricas del experimento 3

Como se puede observar, la calidad superficial de las zonas de downskin parece mejorar con la disminución de la densidad de energía. En las dos muestras de $150\text{J}/\text{mm}^3$ de VED, aparece una gran cantidad de polvo adherido en la zona central, observándose incluso un leve hundimiento debido a la elevada energía aplicada en esta región en la que se han empleado los parámetros de la Tabla 7 (muestras 1C y 1P). A medida que se aumenta la distancia entre puntos y, por tanto, a medida que se disminuye la densidad de energía, la cantidad de polvo en la región de downskin parece disminuir. También mejora la uniformidad de la curva interna de la semiesfera al haber también un menor “escalón” entre la región de downskin y el resto de superficie de la pieza. La siguiente imagen (Figura 48) muestra una fotografía más detallada de las cuatro muestras con modo de haz láser pulsado (1P, 2P, 3P y 4P).

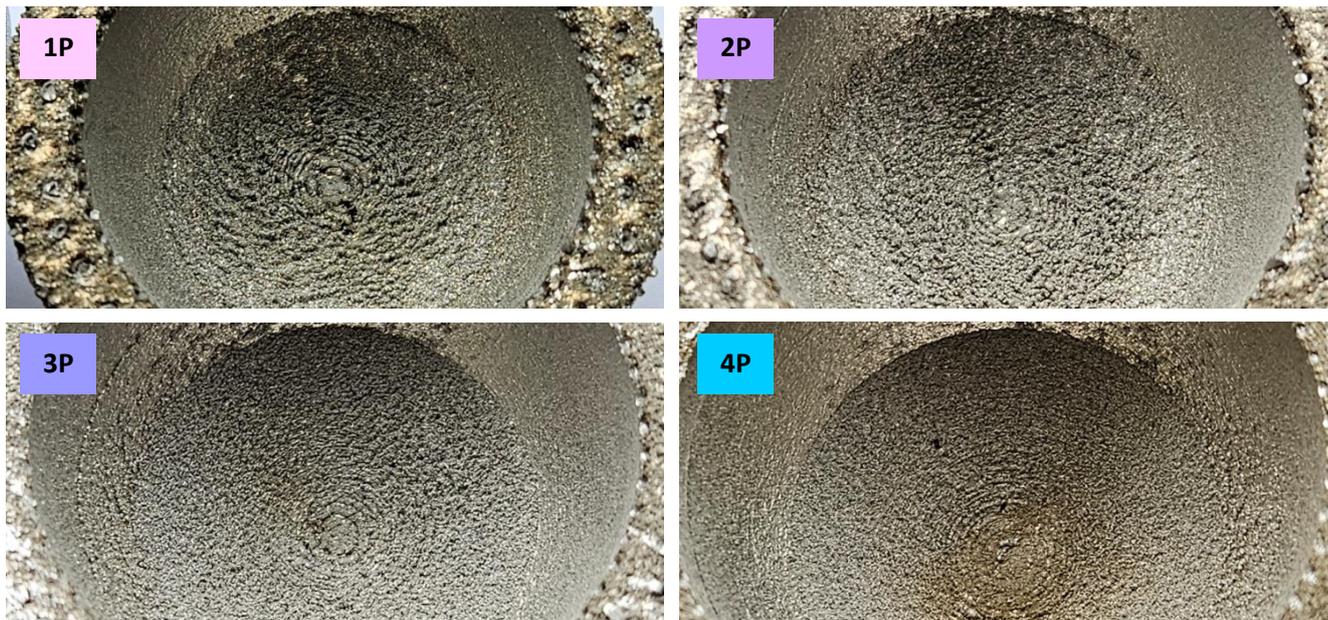


Figura 48. Imagen detalle de las cuatro muestras semiesféricas con modo de haz láser pulsado

De forma visual, parece evidente que se obtienen mejores resultados con esta disminución de la densidad de energía. Sin embargo, esto se va a comprobar también mediante observaciones bajo microscopio y con mediciones directas de la rugosidad de las superficies, realizando también una comparación entre las piezas fabricadas con modo del haz láser pulsado y las piezas con láser continuo.

Microscopio

En primer lugar, se analizan con un microscopio las dos piezas que se obtienen con la menor densidad de energía utilizada (las muestras 4C y 4P, con densidad volumétrica de energía de $25\text{J}/\text{mm}^3$) para comparar las diferencias entre el modo de haz continuo y pulsado. Las siguientes imágenes (Figura 49 y Figura 50) han sido tomadas en la región de downskin de estas dos muestras.

La zona denominada como **top** hace referencia al centro de la región de downskin, la de **middle** a una zona intermedia del downskin, y la de **downskin vs normal** a la frontera entre la superficie de la pieza con parámetros normales y el inicio de los parámetros de downskin.

La región de **top** de ambas muestras (4C.a y 4P.a) presenta un círculo muy bien definido en el centro, lo que indica que aparecen escalones en cada capa al ir cambiando de ángulo en el contorno de la semiesfera. Por otro lado, se observa que el círculo en la muestra 4C está más marcado que en la 4P, pudiendo esto significar

que el modo de haz pulsado se adapta mejor a esta geometría al ser capaz de fabricarla con menos discontinuidades en su perfil.

La región de **middle** (4C.b y 4P.b) es muy similar para las dos muestras, sin aparecer ningún patrón significativo ni grandes diferencias entre las dos.

Por último, la región de **downskin vs normal** (4C.c y 4P.c) permite distinguir claramente la frontera entre la zona de parámetros normales y de parámetros de downskin en las piezas. En las dos muestras, se observa una línea clara que separa estas dos zonas, estando la del modo del haz láser pulsado más marcada. De esto se podría interpretar que el escalón que aparece entre el downskin y la región normal es mayor cuando se emplea el modo pulsado.

Debido a que se obtienen diferentes resultados en función de la zona de las muestras que se analice con el microscopio, solamente con estas imágenes no se puede llegar a una conclusión en cuanto a si es mejor emplear el método de pulsado o continuo del haz láser. Para seguir con el análisis se decide también medir la rugosidad de estas dos piezas en la parte en la que se ha usado los parámetros de downskin.

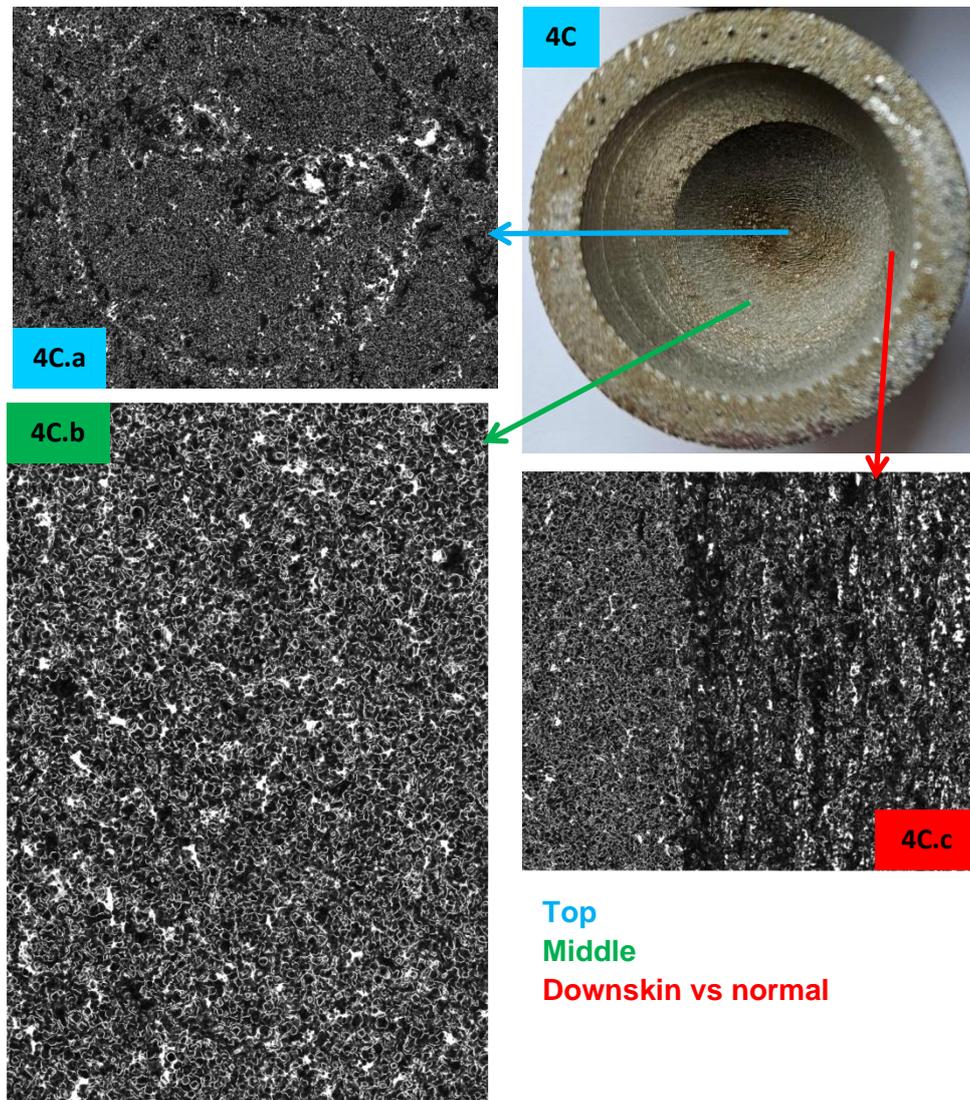


Figura 49. Imágenes bajo microscopio de la muestra 4C del experimento 3

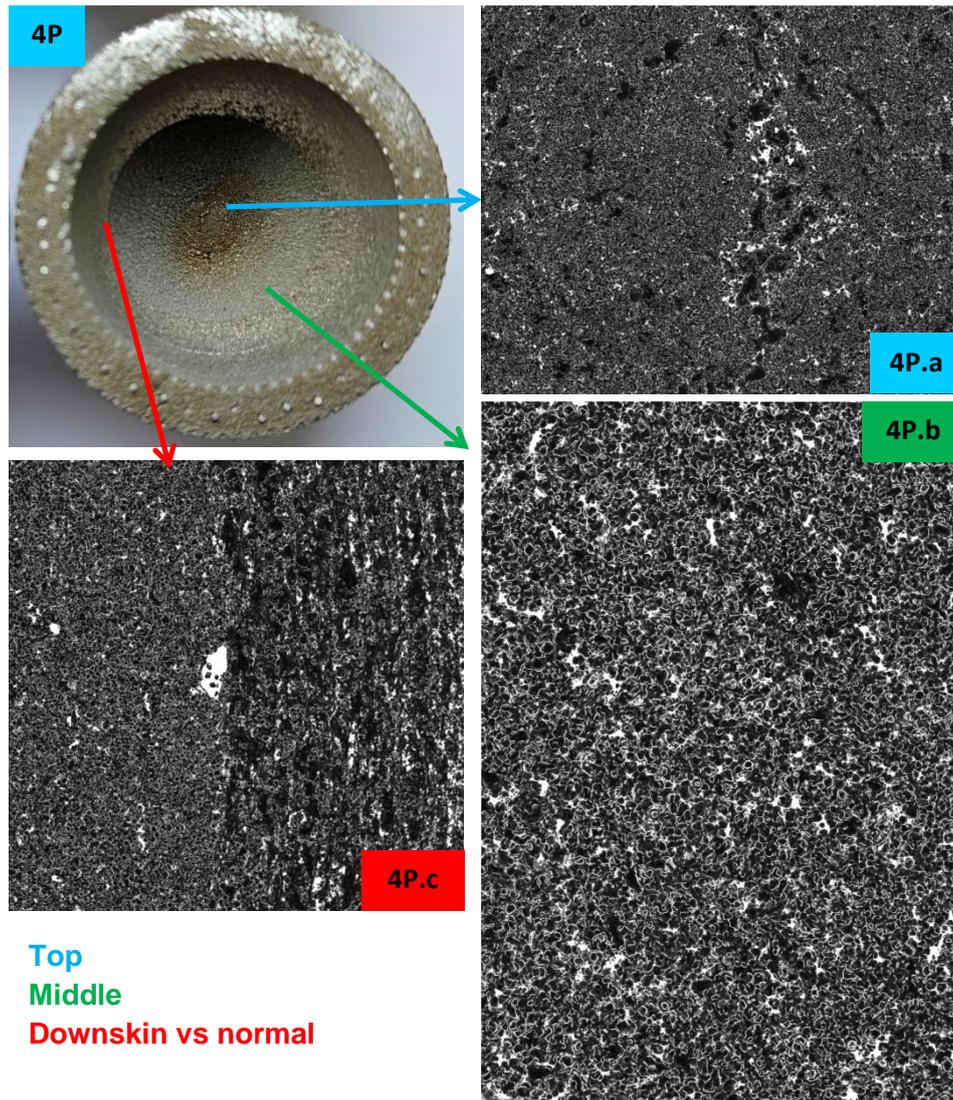


Figura 50. Imágenes bajo microscopio de la muestra 4P del experimento 3

Análisis de rugosidad superficial

La rugosidad de la superficie se mide mediante el sistema de medición óptica de Alicona, obteniendo así los valores medios de rugosidad para cada pieza. Debido a que este sistema mide la rugosidad mediante la diferencia de alturas de las superficies, y se trata de una superficie curva (una semiesfera), en primer lugar, se corrige esta geometría curva con el software de Alicona para poder medir la rugosidad respecto a un plano.

Si comparamos los valores de rugosidad medios de las muestras 4C y 4P se observa que se obtienen valores muy similares para el modo pulsado y el continuo (24.09 μm en continuo y 24.50 μm en pulsado). Por lo tanto, este experimento parece indicar que, para este tipo de geometría, el modo del haz láser no supone una gran diferencia en la calidad de las regiones de downskin. Por otro lado, en la Figura 51 se observa también que los valores más altos de rugosidades aparecen en la zona central de la pieza, ya que es aquí donde se muestra mayor concentración de picos de colores rojos y naranjas (estos colores indican picos de rugosidad más elevados). Esto se debe a que la zona central de la pieza es la que presenta menores ángulos de inclinación respecto a la horizontal (llegando incluso a 0° en el punto central de la semiesfera), y estos ángulos tan pequeños respecto a la superficie son críticos en cuanto a la calidad superficial.

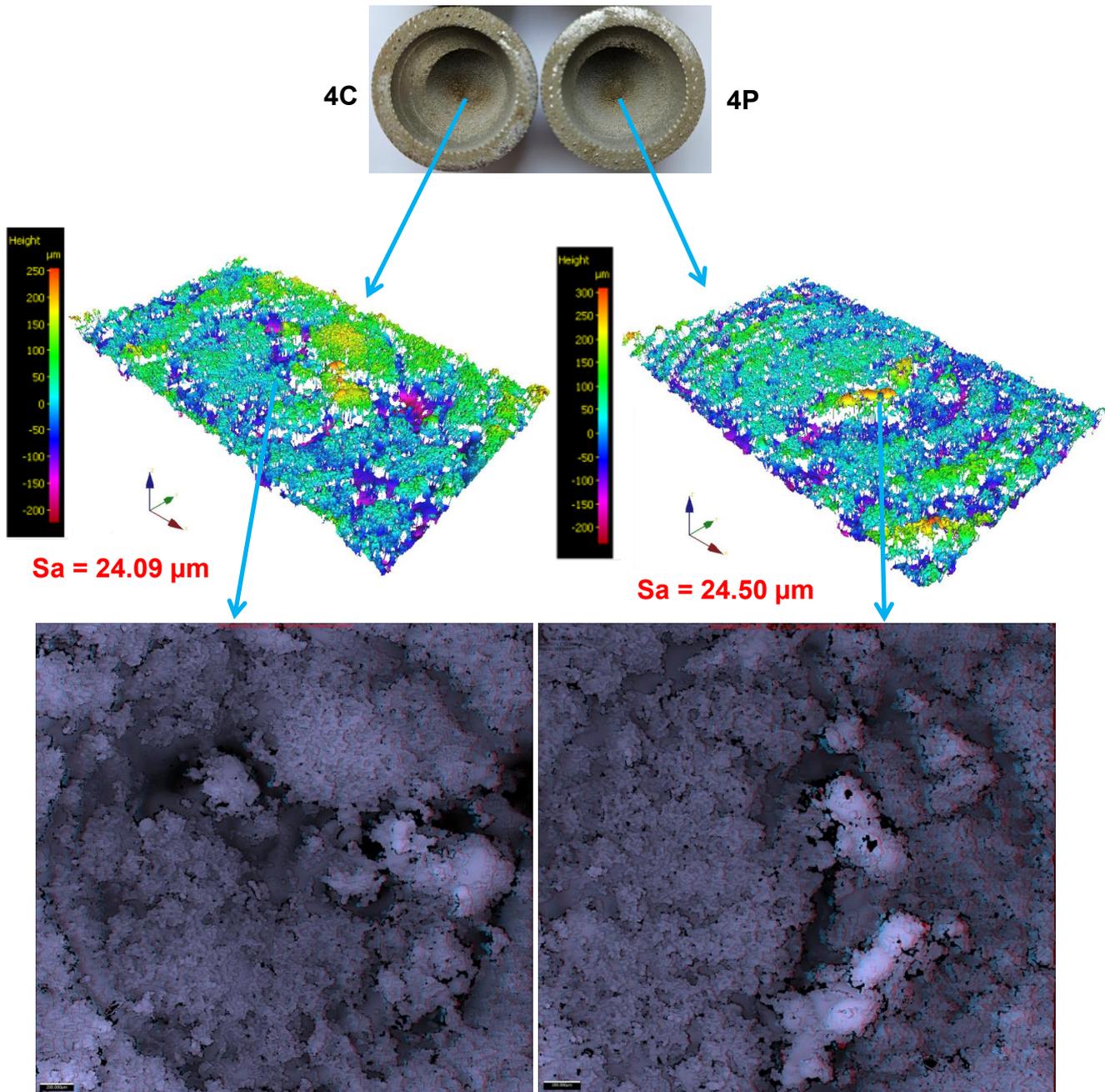


Figura 51. Perfil de rugosidades de las muestras 4C y 4P del experimento 3

De este tercer experimento para la forma semiesférica se obtiene que la calidad superficial de las regiones de downskin parece mejorar con la disminución de la densidad de energía. Por lo tanto, en el próximo experimento se emplean valores pequeños de densidad volumétrica, pero teniendo en cuenta también que dicho valor no se puede disminuir mucho porque eso podría llevar a que el polvo no se fundiera correctamente y las piezas no tuvieran la geometría deseada.

11.3.1.2 Cilindro con aletas

Además de la pieza semiesférica, en el tercer experimento también se ha fabricado una especie de cilindro con aletas para poder observar diferencias en rugosidades para distintas densidades de energía, y también para diferentes ángulos de inclinación dentro de cada pieza. Las siguientes imágenes muestran las 8 piezas

vistas de perfil (Figura 52) y vistas desde abajo (Figura 54) al separarlas de la mesa de fabricación y una vez retirados los soportes.

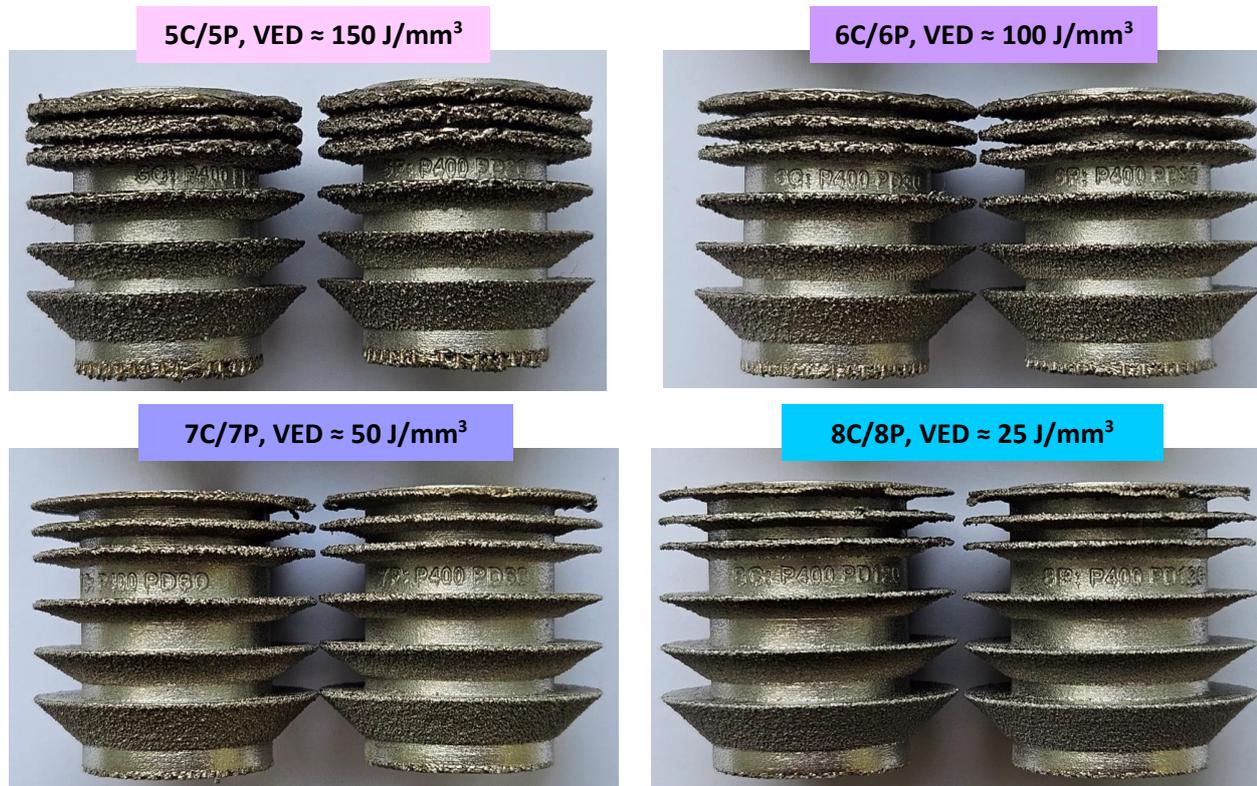


Figura 52. Piezas cilíndricas del experimento 3 vistas de perfil al finalizar la fabricación y una vez extraídas de la plataforma y separados los soportes

A simple vista, en estas dos figuras se observa que la rugosidad va disminuyendo a medida que se reduce la densidad de energía. Observando las piezas de perfil, se ve que en las muestras 5C y 5P, y 6C y 6P (de aproximadamente 150 y 100 J/mm³ respectivamente) las aletas más inclinadas (las de la parte de arriba) tienen mucho material adherido en las superficies de downskin, tanto que apenas se ven las aletas. Las muestras 7C y 7P, y 8C y 8P, que tienen unas menores densidades de energía (de aproximadamente 50 y 25 J/mm³ respectivamente) presentan unas aletas mejor definidas al tener mucho menos material adherido en las regiones de downskin. Por lo tanto, para tener un mayor control geométrico de superficies inclinadas y una menor rugosidad, es mejor emplear densidades de energía bajas.



Figura 53. Vista detalle de las aletas superiores de la muestra 5P (experimento 3)

El poco espacio que hay entre aletas y la gran cantidad de material que se ha adherido en la parte de debajo de cada una, hace que sea muy difícil tomar medidas de rugosidades en estas piezas (Figura 53). Por ello, en este caso el análisis se realiza únicamente de forma visual y no con medidas numéricas.

En la Figura 54 se observa la superficie de downskin de la aleta con mayor superficie de inclinación en cada muestra. Esta aleta es la menos crítica en cada caso en cuanto a la calidad superficial ya que la rugosidad aumenta cuanto menor sea el ángulo de inclinación respecto a la horizontal, y esta aleta es la que mayor ángulo tiene. Desde esta perspectiva se observa también que, para esta aleta, las mejores condiciones son las que emplean unas densidades de energía bajas ya que las energías altas hacen que se adhiera una gran cantidad de polvo y la rugosidad empeore.

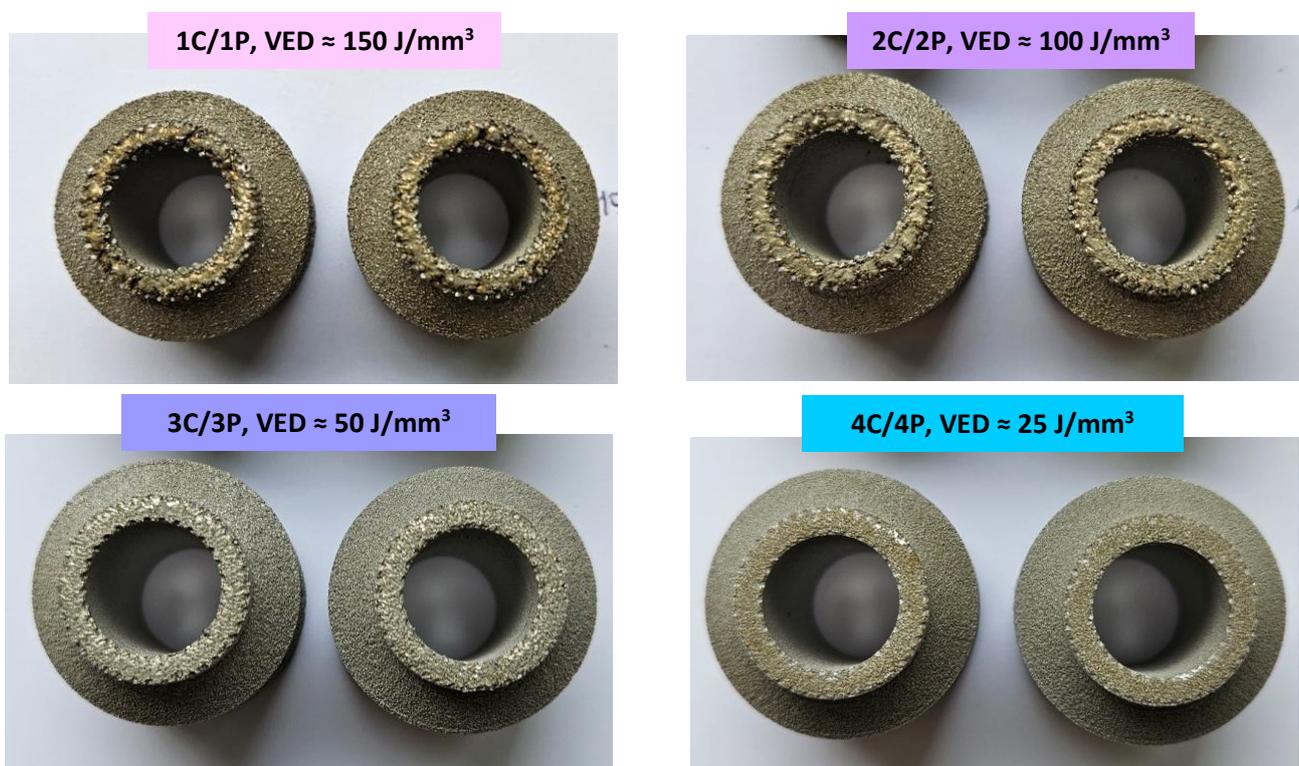


Figura 54. Piezas cilíndricas del experimento 3 vistas desde abajo al final la fabricación una vez extraídas de la plataforma y separados los soportes

Resulta muy interesante lo que se observa en este experimento al comparar las superficies entre piezas (para diferentes energías) y dentro de una misma pieza, al comparar las superficies entre aletas (para diferentes ángulos de inclinación). Todo parece indicar que la rugosidad mejora al disminuir la densidad de energía para cada ángulo de inclinación, y que la rugosidad es menor cuanto mayor sea el ángulo de inclinación (en una misma pieza).

Debido a que la geometría cilíndrica diseñada para este experimento no permite tomar medidas de rugosidades ni observar con claridad las superficies de downskin para los diferentes ángulos, en el cuarto y último experimento se decide diseñar una geometría con forma de bloque, con paredes inclinadas de diferentes ángulos que salen a ambos lados de la pieza.

11.4 Experimento 4: Bloque con paredes inclinadas

En el cuarto experimento se decide fabricar una pieza que consiste en un bloque central, con pequeñas paredes inclinadas que sobresalen a ambos lados. Estas paredes presentan un ángulo de inclinación respecto a la horizontal que incrementa 10° entre dos paredes consecutivas (en un lado las paredes son de 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90°, y en el otro son de 5°, 15°, 25°, 35°, 45°, 55°, 65°, 75°).

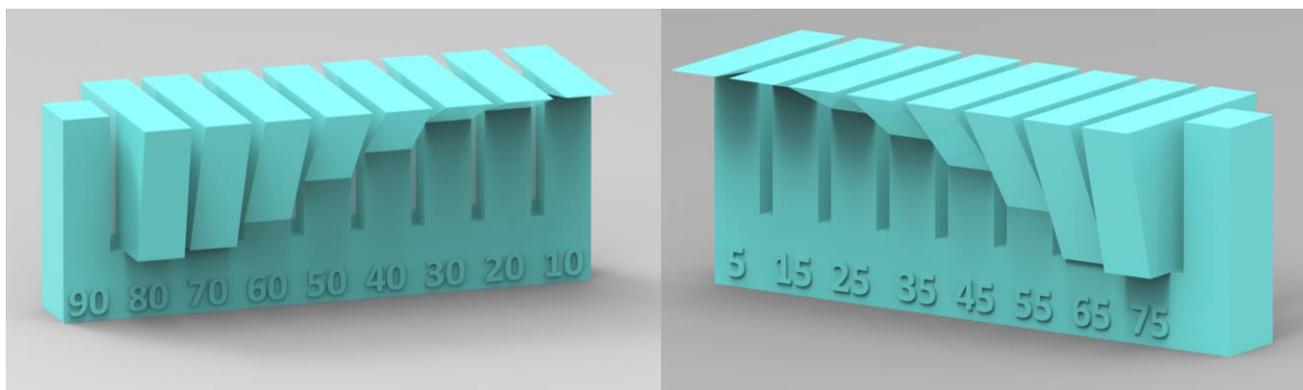


Figura 55. Geometría de la pieza con paredes inclinadas del experimento 4

De los tres primeros experimentos se obtiene la idea general de que conviene usar valores de densidad de energía bajos para obtener mejores calidades superficiales de las regiones de downskin. En este cuarto experimento se usan densidades de energía bajas (en el intervalo de 2 J/mm³ a 25 J/mm³), pero disminuyendo también la densidad de energía desde el interior de la sección hacia los bordes. Para ello, se emplean diferentes densidades de energía en los hatches, contorno, borde adicional y borde, disminuyendo en dicho orden.

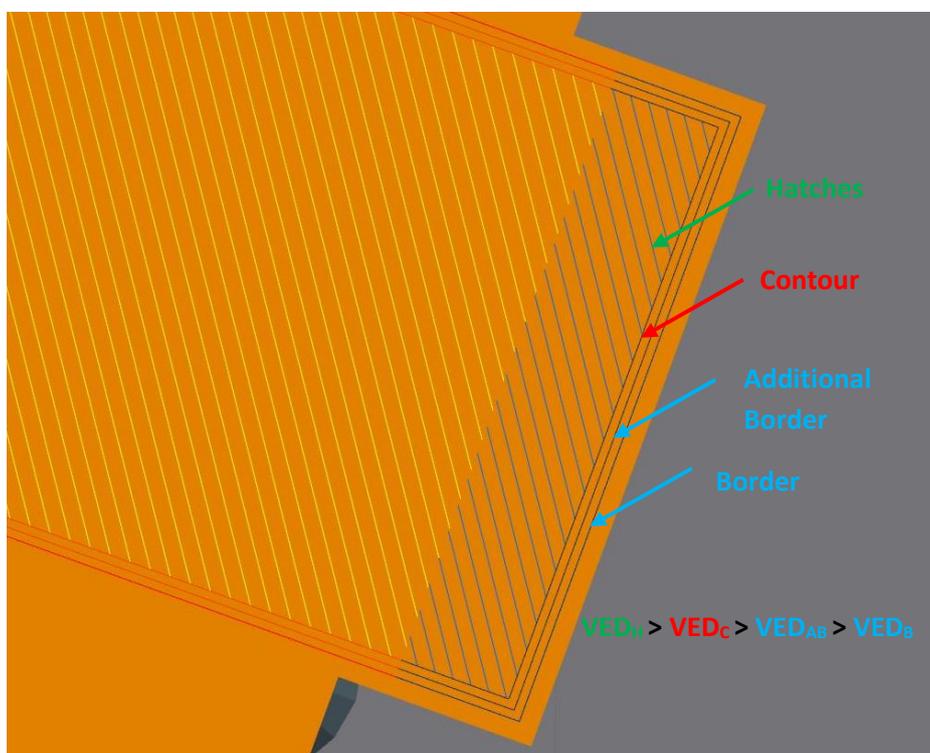


Figura 56. Zonas de las regiones de downskin

En este experimento se fabrican 22 piezas con diferentes valores de potencia (P), distancia entre puntos (PD) y densidad de energía volumétrica (VED), manteniendo constante el tiempo de exposición (ET: 20 μ s), el número de exposiciones (NE: 1), el número de capas (NL: 3), la distancia de borde/contorno (CD: 80 μ m) y la distancia de hatch (DH: 80 μ m). La siguiente tabla muestra los valores de potencia, distancia entre puntos y densidad de energía volumétrica para las muestras en cada zona (borde, borde adicional, hatches y contorno).

Tabla 8. Parámetros de fabricación del experimento 4

Ref	Border			Hatches			Contour			Additional Border				
	P [W]	PD [μ m]	VED [J/mm^3]	P [W]	PD [μ m]	VED [J/mm^3]	P [W]	PD [μ m]	VED [J/mm^3]	P [W]	PD [μ m]	VED [J/mm^3]		
0C	30	30	4,16	50	20	10,41	30	20	6,25	30	20	6,25		
0P														
1P	70	30	9,72	120	20	25,00	80	20	16,67	60	20	12,50		
2P	60		8,33				100		66			13,75	50	10,42
3P	50		6,94				80		54			11,25	40	8,33
4P	40		5,55				60		40			8,33	30	6,25
5P	30		4,16				40		27			5,63	20	4,17
6P	20		2,77				20		13			2,71	10	2,08
7P	105	45	9,72	180	30	25,00	120	30	16,67	90	30	12,50		
8P	90		8,33				150		99			13,75	75	10,42
9P	75		6,94				120		81			11,25	60	8,33
10P	60		5,55				90		60			8,33	45	6,25
11P	45		4,16				60		41			5,63	30	4,17
12P	30		2,77				30		20			2,71	15	2,08
13P	140	60	9,72	240	40	25,00	160	40	16,67	120	40	12,50		
14P	120		8,33				200		132			13,75	100	10,42
15P	100		6,94				160		108			11,25	80	8,33
16P	80		5,55				120		80			8,33	60	6,25
17P	60		4,16				80		54			5,63	40	4,17
18P	40		2,77				40		26			2,71	20	2,08
19C	NAD – Not Activated Downskin													
19P														

P: Power [W], PD: Point Distance [μ m], VED: Volumetric energy density [J/mm^3]

Las dos primeras muestras (0C y 0P) emplean los valores predeterminados de fabricación de la máquina para las regiones de downskin, en modo de haz láser continuo y pulsado respectivamente. Las dos últimas piezas (19C y 19P) se fabrican sin activar los parámetros de downskin, por lo que en estas zonas se usan los mismos parámetros de fabricación que en el resto de la pieza.

Para establecer los parámetros del resto de muestras del experimento (1P-18P), primero se fijan los valores para la zona de hatches, y a partir de estos se establecen los del resto de zonas.

Muestras 1P – 6P

En la zona de **hatches** se fija una distancia entre puntos de 20 μm , y la potencia se va disminuyendo de 120 W a 20W en saltos de 20 W. Esto da lugar a unas VED también decrecientes, de 25 J/mm^3 a 4,16 J/mm^3 . La VED de los **contornos** se reduce un 35% aproximadamente con respecto a la de los hatches, obteniendo valores que disminuyen de 16,67 J/mm^3 hasta 2,71 J/mm^3 . Si se fija una distancia entre puntos de 20 μm para el contorno de estas 6 primeras muestras, se obtienen de nuevo unos valores de potencia que van disminuyendo de 80 W a 13 W. La VED de los **bordes adicionales** se reduce un 50% respecto de los hatches, dando lugar a densidades de energía que van de 12,50 J/mm^3 a 2,08 J/mm^3 . La distancia entre puntos se fija de nuevo en 20 μm , por lo que las potencias disminuyen de 60 W a 10 W, en saltos de 10 W entre dos muestras consecutivas. En los **bordes** se reduce la VED un 63% respecto de los hatches, y se fija una distancia entre puntos de 30 μm , que es algo mayor que en el resto de las zonas. Las potencias disminuyen de 70 W a 20 W, en saltos de 10 W entre dos muestras consecutivas.

Muestras 7P – 12P

Para estas 6 muestras siguientes se repiten los valores de VED empleados en las 6 primeras, pero variando la potencia y la distancia entre puntos. La distancia entre puntos se aumenta hasta el 150%, por lo que la potencia debe aumentarse en la misma proporción para que la VED se mantenga igual que en las 6 primeras muestras. Esto se aplica en las cuatro zonas (hatches, contorno, borde adicional y borde).

Muestras 13P – 18P

Para las 6 últimas muestras de nuevo se repiten los valores de VED empleados en las 6 primeras, pero variando la potencia y la distancia entre puntos. La distancia entre puntos se aumenta hasta el 200% con respecto a la empleada en las 6 primeras muestras, por lo que la potencia debe aumentarse en la misma proporción para que la VED se mantenga igual. Esto se aplica en las cuatro zonas (hatches, contorno, borde adicional y borde).

Con estos 18 grupos de parámetros empleados se pretende estudiar el efecto que tiene la densidad volumétrica de energía en el acabado superficial de las zonas de downskin para el ángulo de inclinación de cada pared, así como el efecto que tiene emplear una potencia o una distancia entre puntos mayores para una misma VED (por ejemplo, las muestras 1P, 7P y 13P tienen la misma VED en cada zona pero diferentes P y PD).

En la siguiente imagen (Figura 57) se muestra la disposición de las 22 muestras en la plataforma de fabricación en el software de QuantAM. Para evitar que haya diferencias significativas por la posición de las piezas entre la 0C y 0P y entre la 19C y 19P, estas dos parejas se han fabricado una al lado de otra. El resto de muestras se han distribuido por la región superior izquierda ya que es aquí donde el láser trabaja en su punto óptimo de funcionamiento.

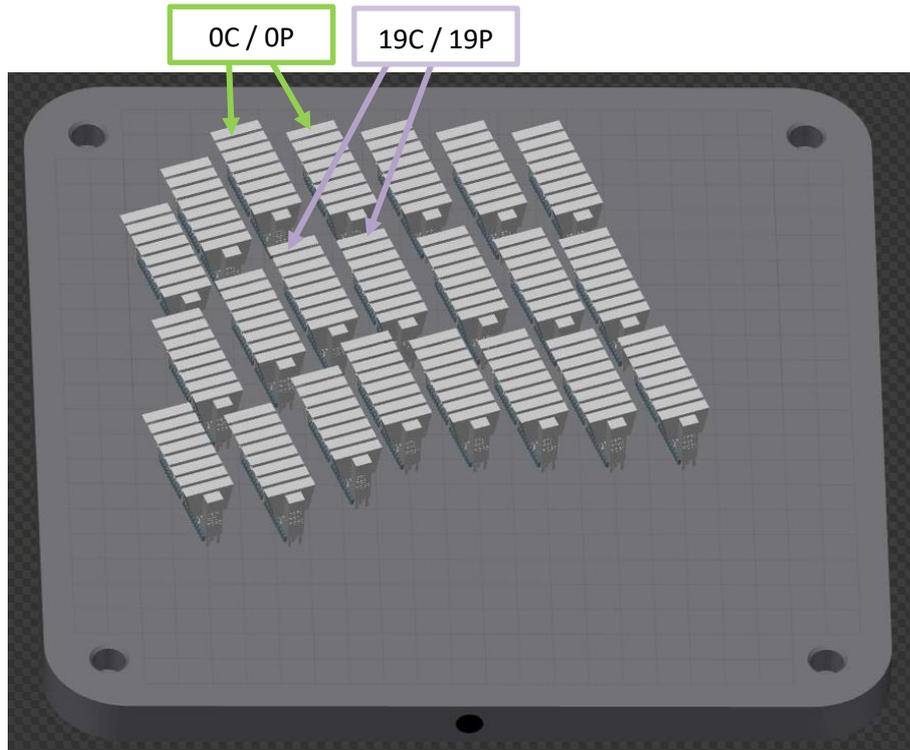


Figura 57. Disposición de las muestras sobre la plataforma de fabricación en el software de QuantAM

Para identificar las piezas una vez fabricadas y retiradas de la plataforma de fabricación, se ha incluido en el diseño de la pieza la referencia identificativa de cada una de ellas, así como la potencia y la distancia entre puntos. Además, se han colocado unos soportes para aguantar las capas horizontales que están en contacto con el polvo durante la fabricación, y para evitar que las piezas se deformen debido a tensiones térmicas. En la siguiente imagen se muestran las piezas 6P y 4P como ejemplo para mostrar esto.

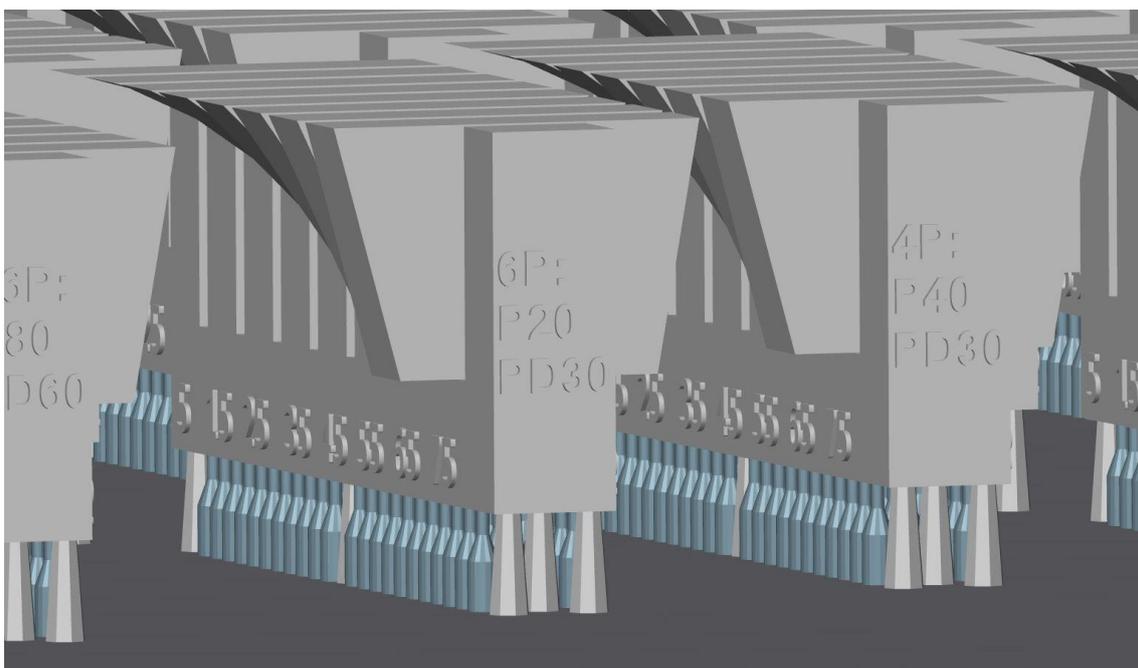


Figura 58. Imagen detalle de las piezas 4P y 6P con los soportes sobre la plataforma de fabricación

11.4.1 Análisis de resultados (experimento 4)

Al finalizar el cuarto experimento se obtienen 22 muestras (2 con los parámetros de downskin que establece la máquina por defecto, en modo pulsado y continuo, 2 sin activar los parámetros de downskin, en modo pulsado y continuo, y 18 con diferentes parámetros, en modo pulsado). Las 22 muestras observadas desde arriba una vez retirado todo el polvo metálico no fundido al terminar de fabricarlas aparecen en la Figura 59.



Figura 59. Muestras del experimento 4 sobre la plataforma de fabricación

A simple vista se puede apreciar que las paredes inclinadas con menores ángulos de inclinación respecto a la horizontal (señaladas en rojo en la siguiente imagen), no se han llegado a fabricar correctamente ya que todas deberían tener la misma anchura vista desde arriba, y esto no es lo que se ha obtenido de la fabricación. Por lo tanto, parece ser que al reducir tanto la VED, se ha empeorado la fabricabilidad de las piezas ya que no se cumplen con las dimensiones geométricas de las piezas diseñadas.

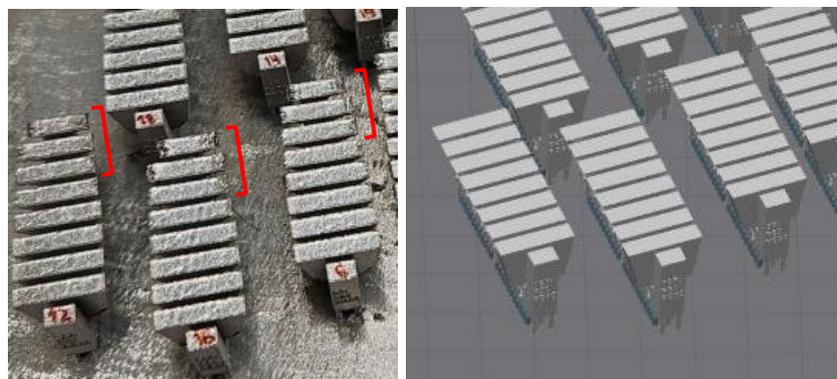


Figura 60. Comparación visual entre las piezas reales y el diseño CAD

Al haber observado esta diferencia en las dimensiones de la pieza entre el modelo digital y el fabricado, en primer lugar, se realiza un análisis de la fabricabilidad de las piezas, y más tarde se estudia el acabado superficial de las zonas de downskin.

Fabricabilidad y dimensiones geométricas

A la hora de analizar la fabricabilidad de las piezas diseñadas se ha decidido medir el ancho de las aletas que sobresalen a los lados del bloque, siendo esta longitud teórica de 15mm.

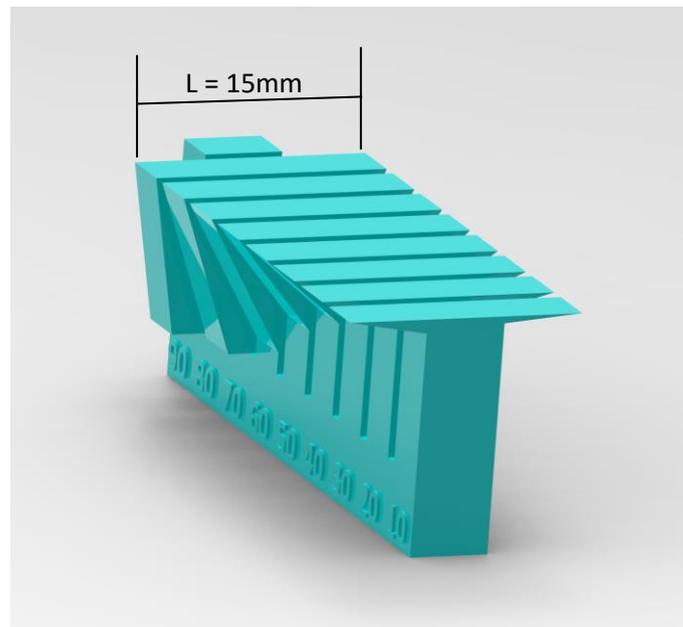


Figura 61. Ancho teórico de las paredes inclinadas de las piezas del experimento 4

Para todas las muestras, se han tomado 3 medidas para cada aleta correspondiente a cada pareja de ángulos, uno a cada lado de la aleta (5°-10°, 15°-20°...), y se ha realizado la media de estas tres medidas para luego compararlo con el valor teórico.

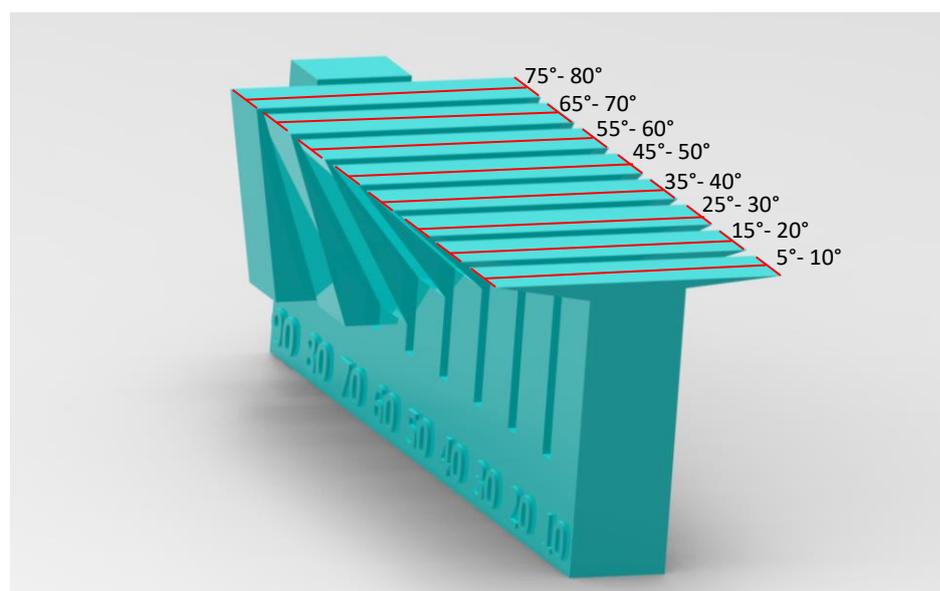


Figura 62. Parejas de ángulos correspondiente a cada aleta

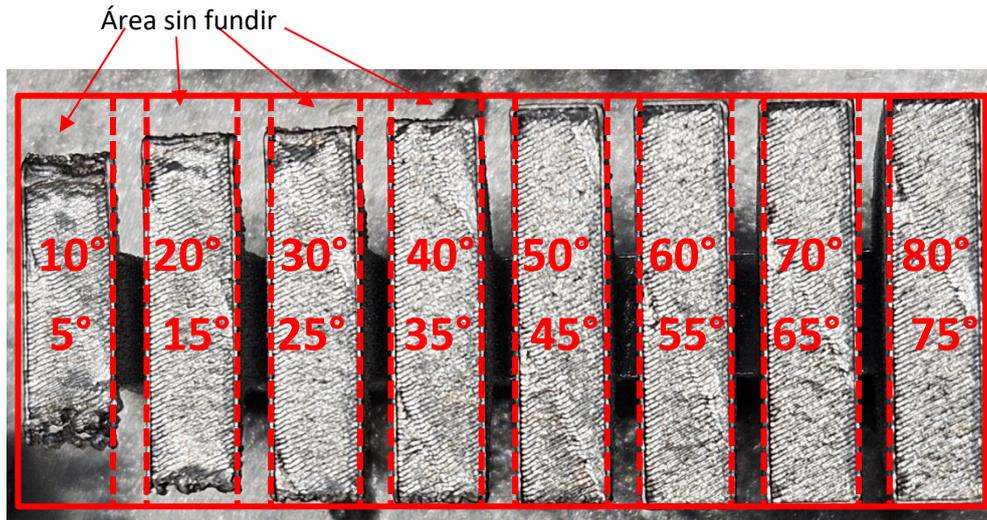


Figura 63. Muestra del experimento 4 vista desde arriba con las parejas de ángulos indicadas

El valor medio del ancho de las paredes para cada pareja de ángulos en cada pieza se muestra en la Tabla 9. En esta tabla, las muestras se agrupan en 4 grupos: 1P-6P, 7P-12P, 13P-18P, y 19P y 0P. Como se puede observar, el ancho de la pieza se puede considerar aceptable hasta los 45° porque se mantiene muy cercano a los 15 mm en casi todas las muestras. Por otro lado, observando la pareja de ángulos más pequeños (5°-10°) se ve que el ancho disminuye con la disminución de la densidad de energía. Esto significa que, si reducimos mucho la densidad de energía con el objetivo de mejorar la calidad superficial en las regiones de downskin, la fabricabilidad y las dimensiones geométricas de las piezas se pueden ver comprometidas, sobre todo para ángulos muy pequeños respecto a la horizontal.

Tabla 9. Valor medio de la anchura de las aletas (mm) del experimento 4

	1P	2P	3P	4P	5P	6P
75°-80°	14,93	14,92	14,93	14,91	14,94	14,90
65°-70°	14,91	14,90	14,91	14,92	14,90	14,92
55°-60°	14,87	14,89	14,92	14,87	14,87	14,90
45°-50°	14,79	14,78	14,68	14,68	14,62	14,67
35°-40°	14,59	14,50	14,33	14,26	14,19	14,20
25°-30°	14,38	14,17	14,05	13,87	13,81	13,81
15°-20°	14,17	14,07	13,99	13,49	13,29	13,28
5°-10°	12,92	12,73	12,17	11,42	10,91	10,96

	7P	8P	9P	10P	11P	12P
75°-80°	14,92	14,94	14,92	14,91	14,93	14,93
65°-70°	14,90	14,92	14,93	14,88	14,90	14,92
55°-60°	14,92	14,90	14,90	14,88	14,89	14,89
45°-50°	14,83	14,78	14,78	14,62	14,60	14,69
35°-40°	14,65	14,61	14,47	14,25	14,18	14,20
25°-30°	14,41	14,09	14,28	14,00	13,80	13,79
15°-20°	14,17	14,06	13,88	13,31	13,29	13,23
5°-10°	12,79	12,83	12,43	10,95	10,58	10,87

	13P	14P	15P	16P	17P	18P	0P	19P
75°-80°	14,94	14,91	14,93	14,92	14,91	14,91	14,89	14,90
65°-70°	14,90	14,90	14,92	14,91	14,90	14,90	14,89	14,88
55°-60°	14,89	14,89	14,88	14,91	14,90	14,91	14,86	14,87
45°-50°	14,79	14,80	14,79	14,71	14,59	14,67	14,63	14,82
35°-40°	14,69	14,63	14,47	14,28	14,21	14,19	14,22	14,81
25°-30°	14,43	14,35	14,13	14,04	13,80	13,77	13,86	14,76
15°-20°	14,20	14,23	13,32	13,87	13,27	13,32	13,24	14,71
5°-10°	13,09	12,34	12,08	11,07	10,58	10,67	10,89	14,12

A continuación, se muestra la gráfica que representa el ancho de las paredes para todas las piezas y cada pareja de ángulos. Como se veía en las tablas, para los ángulos más grandes con la horizontal, el ancho de las piezas se mantiene aceptable. Sin embargo, para ángulos muy pequeños (5°-10°, 15°-20°) este ancho se reduce de forma crítica, y todavía más para las piezas en las que se han empleado menores densidades de energía en la zona de downskin (5P,6P, 11P, 12P, 17P, 18P).

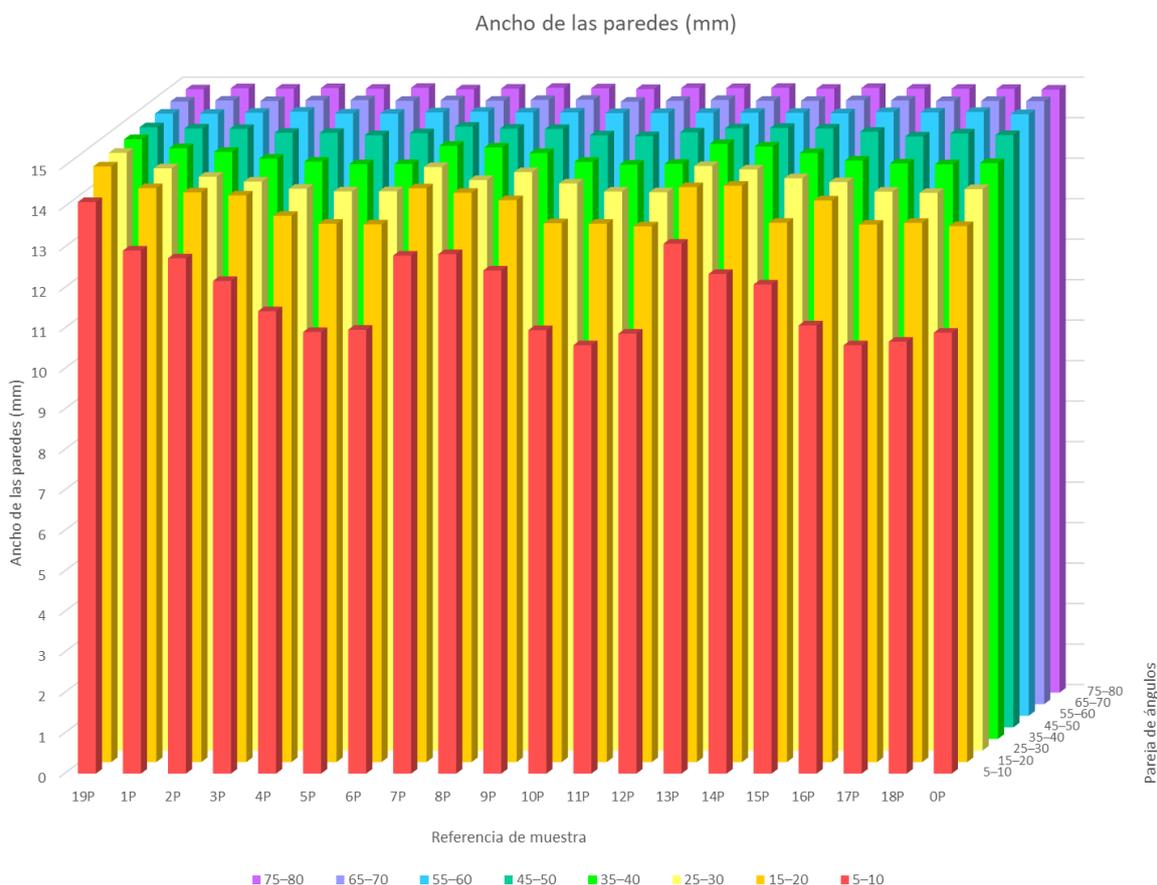


Figura 64. Gráfico del ancho de las paredes (mm) de las piezas del experimento 4

Las paredes correspondientes a la pareja de ángulos 5°-10° es la más crítica para todas las piezas al aparecer aquí las mayores diferencias de anchura respecto al valor teórico. Además, la fabricación de ángulos tan pequeños también es crítica en cuanto a la rugosidad en la zona de downskin sin soportes. Por lo tanto, en este tipo de geometrías es necesario encontrar el equilibrio entre mejorar la rugosidad reduciendo la densidad de energía y mejorar la fabricabilidad aumentando la densidad de energía.

Rugosidad en la zona de downskin

El segundo parámetro que se analiza en este experimento es la rugosidad en las zonas de downskin, centrándonos en los ángulos más pequeños ya que son estos los que presentan las mayores rugosidades. Primero, se analiza la rugosidad de forma visual en las piezas y luego se realiza un análisis cuantitativo midiendo la rugosidad en el ángulo de 35°. Se decide medir la rugosidad en este ángulo porque si escogemos un ángulo mucho menor, aparecen problemas a la hora de medir ya que el ancho de las piezas es demasiado pequeño (debido al problema de fabricabilidad explicado en el apartado anterior).

En la siguiente imagen, se pueden observar todas las muestras 1P-18P vistas desde la parte de abajo y colocadas de tal forma que tengan la misma densidad de energía (por columnas) y la misma distancia entre puntos del láser (por filas).

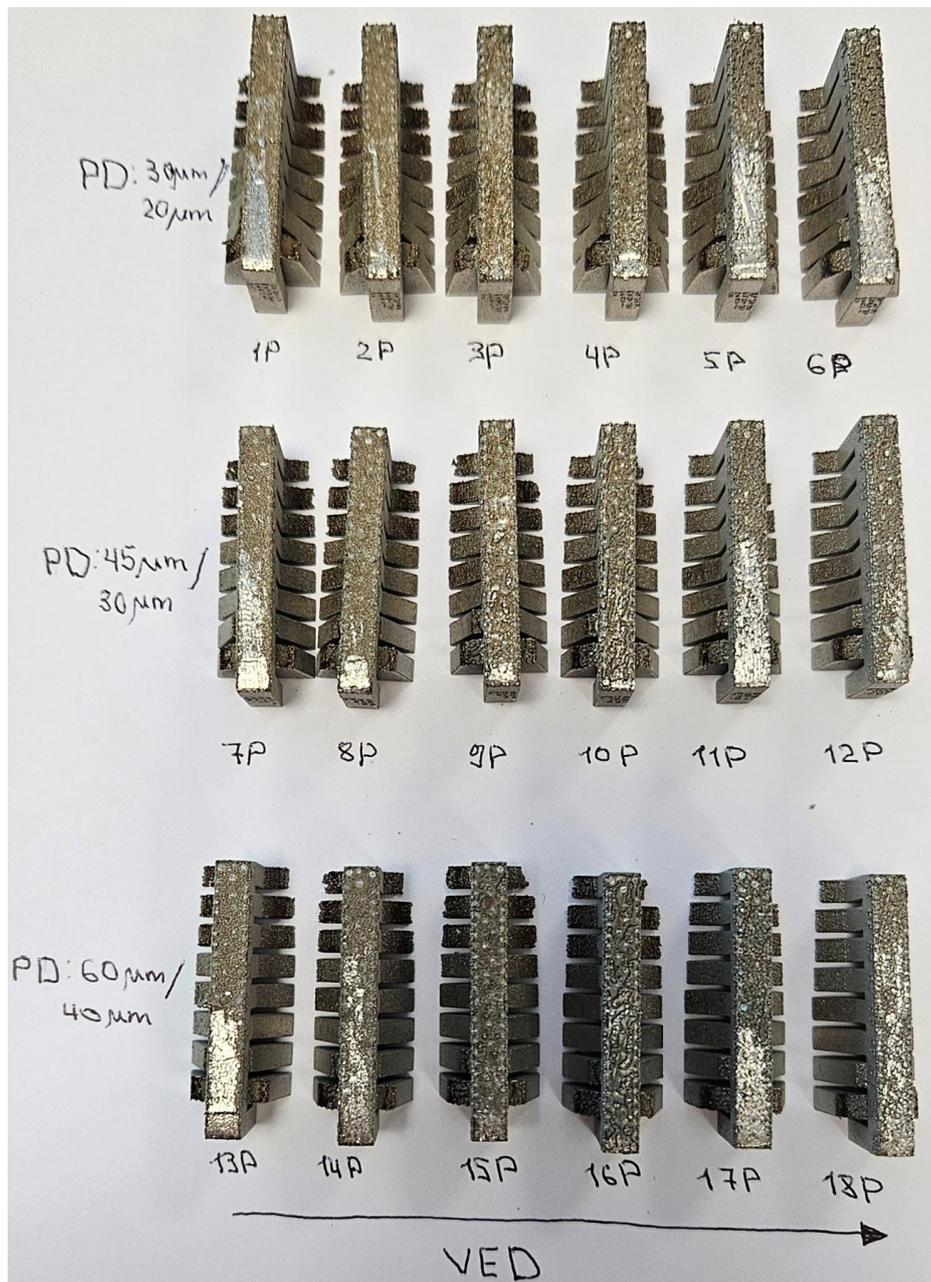


Figura 65. Muestras del experimento 4 vistas desde abajo

Entre estas 18 muestras, resulta muy complicado apreciar grandes diferencias a simple vista. Por ello, más adelante se muestran los valores de rugosidad medidos numéricamente para poder realizar un análisis entre las muestras. En las siguientes imágenes se muestran también una vista con más detalle de uno de los lados de las piezas en los ángulos de las paredes de 10°, 20°, 30° y 40°.

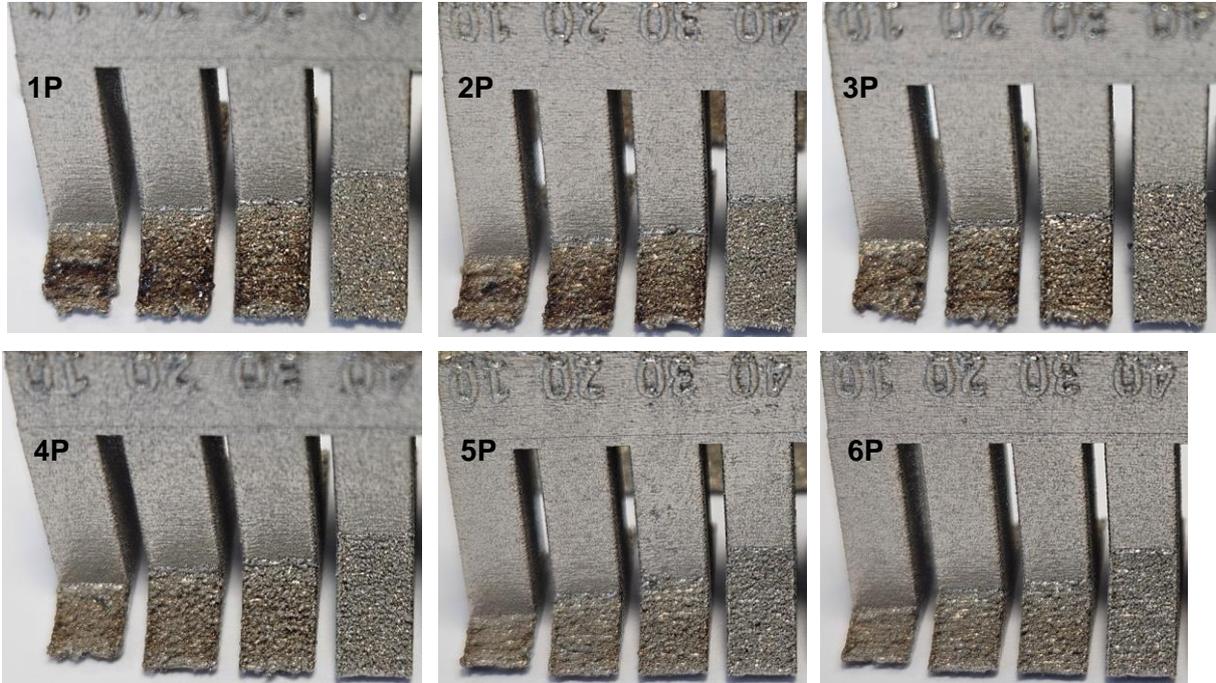


Figura 66. Vista detalle de la zona de downskin de las piezas 1P-6P, ángulos 10°, 20°, 30°, 40° (experimento 4)

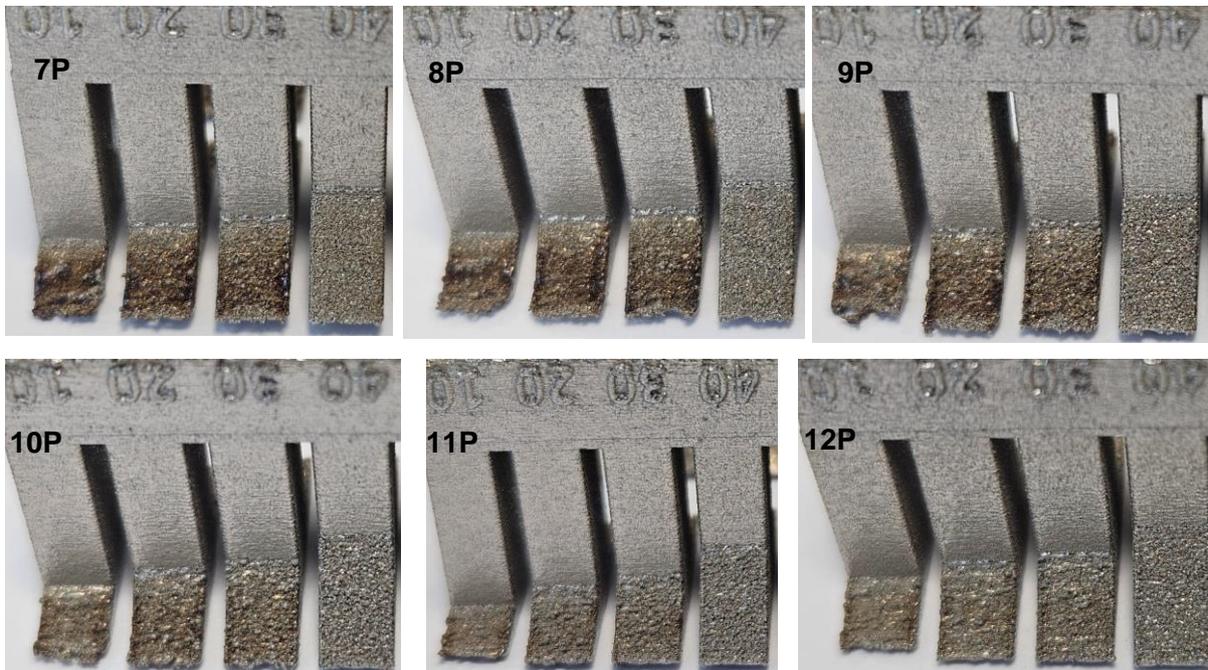


Figura 67. Vista detalle de la zona de downskin de las piezas 7P-12P, ángulos 10°, 20°, 30°, 40° (experimento 4)

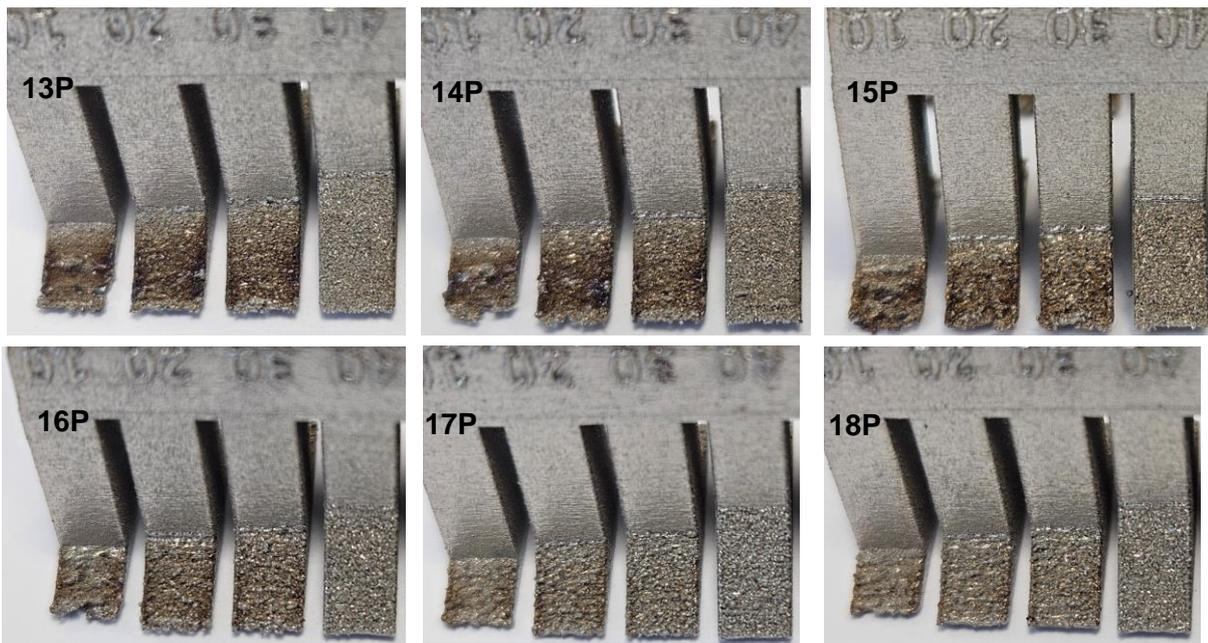


Figura 68. Vista detalle de la zona de downskin de las piezas 13P-18P, ángulos 10°, 20°, 30°, 40° (experimento 4)

A simple vista, se sigue sin observar una gran diferencia de rugosidad entre las muestras, por lo que resulta difícil analizar los resultados de rugosidad de esta manera. Sin embargo, sí se puede ver que las muestras que han empleado mayores densidades de energía (1P, 2P, 3P, 7P, 8P, 9P, 13P, 14P, 15P), tienen un tono más oscuro, que indica que el material se ha podido quemar levemente. El análisis cuantitativo de la rugosidad se realiza con una medición de la rugosidad superficial de uno de los ángulos críticos: el de 35°. Se decide medir en este ángulo porque si escogemos un ángulo mucho menor, el ancho de la superficie es mucho menor debido al problema de fabricabilidad explicado anteriormente. Esto se realiza a través de la máquina de Alicona con una lente de aumento de x20. En las siguientes imágenes se muestra la colocación de una de las piezas en la máquina mientras se estaba realizando una medición.

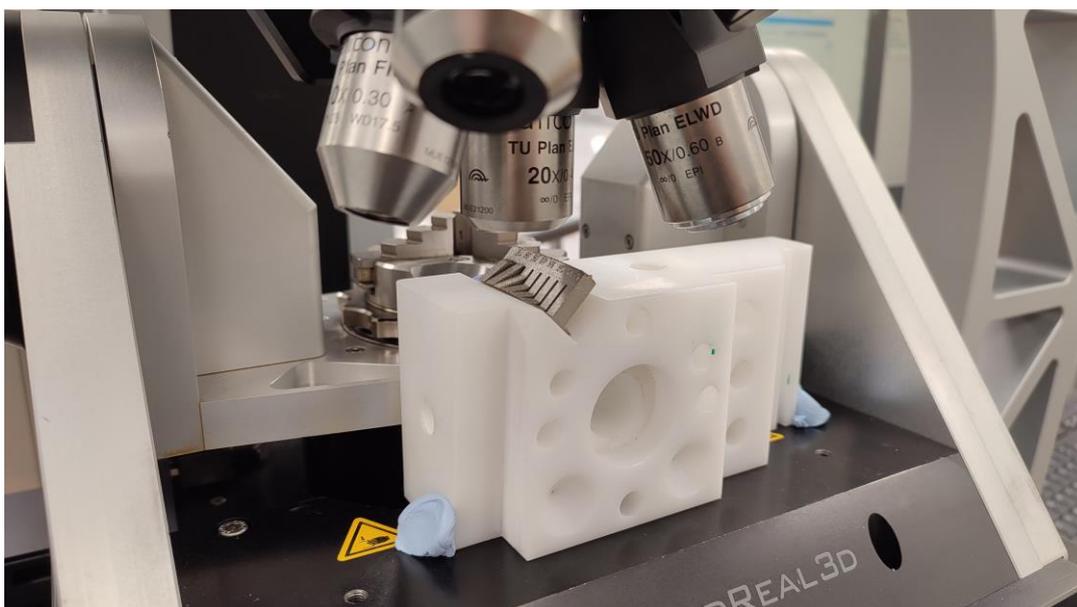


Figura 69. Colocación de la pieza en el soporte para medir (experimento 4)

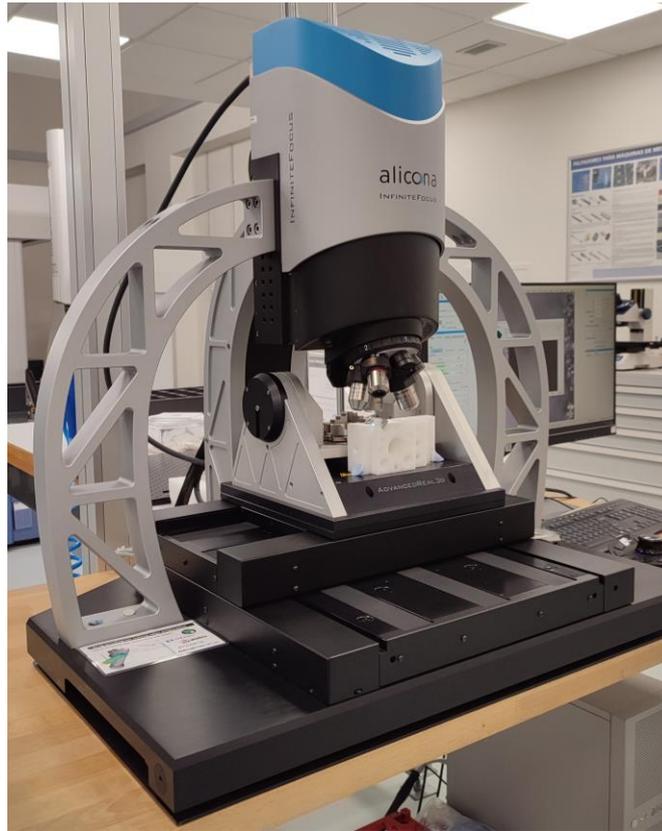


Figura 70. Colocación de la pieza y el soporte durante una medición (experimento 4)

De aquí se obtiene directamente una imagen que representa la rugosidad de la pieza con colores. La imagen que se obtiene mide la costa de los puntos de la superficie y con esto extrae los valores de rugosidad. Por lo tanto, si la superficie no está perfectamente colocada en el plano horizontal, el programa toma esta inclinación como rugosidad. Por lo tanto, sobre esta medición se debe aplicar un filtro que elimine la inclinación de la muestra para medir directamente sobre el plano.

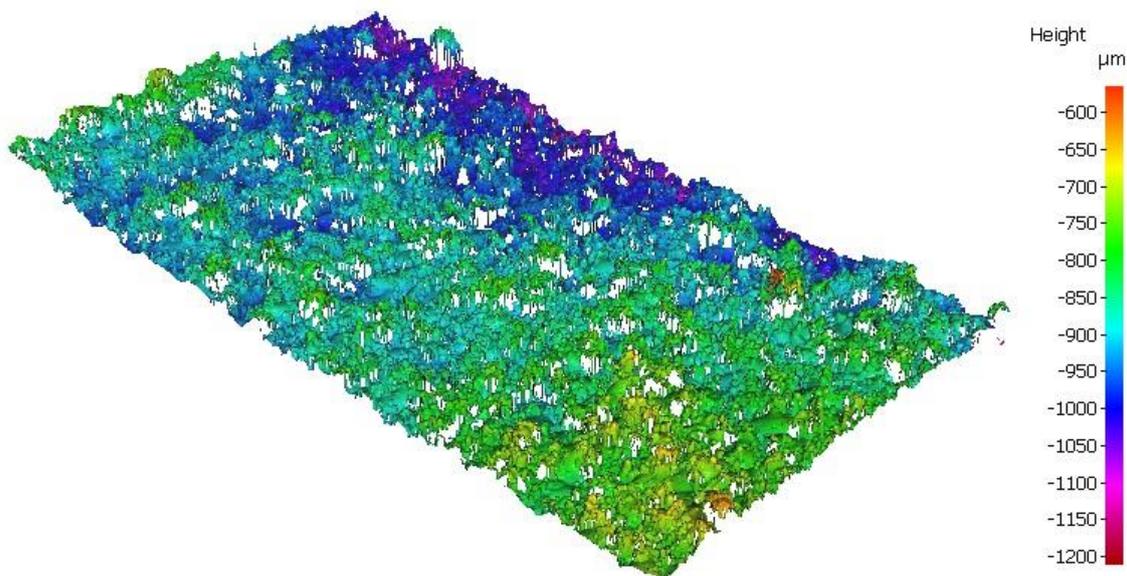


Figura 71. Vista 3D de la rugosidad de la muestra 3P sin haber aplicado un filtro

Sobre esta vista, se aplica un filtro que elimina la inclinación de la superficie y se obtiene la rugosidad medida sobre el plano. En las siguientes imágenes se puede observar la diferencia entre la imagen antes y después de eliminar la inclinación de la superficie.

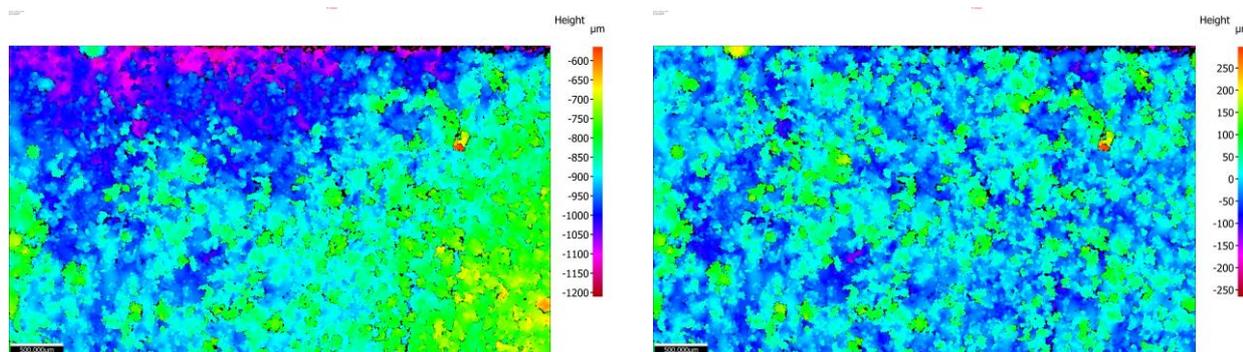


Figura 72. Plano de la rugosidad antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el filtro para corregir la inclinación

Como se puede observar en la imagen de la izquierda, antes de aplicar el filtro se obtiene una superficie en la que aparecen zonas claramente diferenciadas de diferentes colores. Por otro lado, tras haber aplicado el filtro, se obtiene una superficie con la rugosidad distribuida de forma uniforme sobre ella. Este procedimiento de corregir la inclinación de la superficie se realiza para todas las piezas y se obtiene el valor medio de la rugosidad para cada una.

Tabla 10. Valores de rugosidad de las muestras 1P-18P

	Muestra	Rugosidad (μm)	Potencia (P), Distancia entre puntos (PD)
1P - 6P	1P	34,995	100%
	2P	33,635	
	3P	34,792	
	4P	45,881	
	5P	38,736	
	6P	38,353	
7P - 12P	7P	34,407	150%
	8P	31,35	
	9P	34,055	
	10P	34,948	
	11P*	47,952	
	12P	42,981	
13P - 18P	13P	34,116	200%
	14P	33,146	
	15P	33,873	
	16P	37,081	
	17P	38,39	
	18P	40,168	

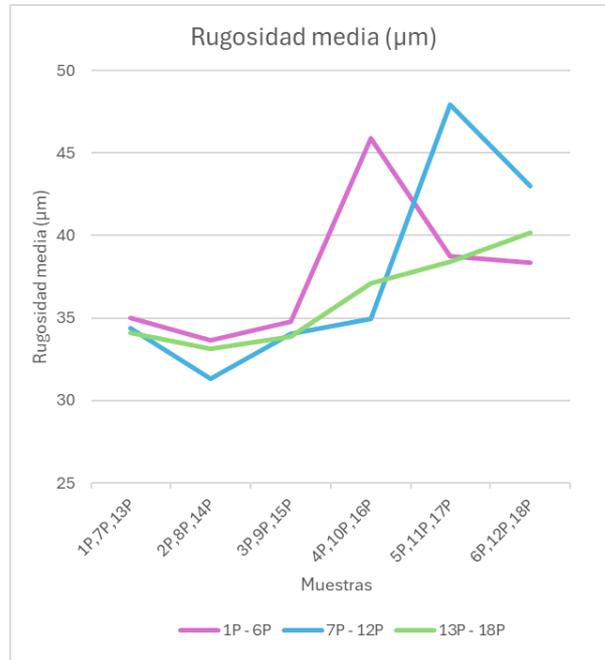


Figura 73. Gráfica de la rugosidad de las muestras 1P - 18P

*La muestra 11P no se debe considerar ya que tiene un defecto por una deformación en el recoater que hizo que la pieza no se fabricara correctamente.

Como se puede observar en la tabla y en la gráfica, la rugosidad es mínima en cada grupo de muestras en la muestra 2P, 8P, y 14P, teniendo estas tres muestras la misma densidad de energía volumétrica (hay que recordar que las muestras 1P, 7P y 13P tienen la misma densidad, las muestras 2P, 8P y 14P tienen la misma densidad, y así sucesivamente. Por lo tanto, la mejor rugosidad se obtiene para la densidad de energía volumétrica de 20,83 J/mm³ en la zona de hatches de la superficie de downskin. Entre las tres muestras que tienen esta densidad de energía, la menor rugosidad se obtiene en la muestra 8P. Esta muestra es la que corresponde a una potencia y una distancia entre puntos intermedia (la muestra 2P tiene la P y PD más baja y la 14P la más alta).

Por lo tanto, se observa que la calidad superficial sí que ha mejorado al emplear densidades de energía volumétrica más bajas, pero hay un punto en el cual el material no se llega a fundir correctamente por lo que no interesa seguir reduciéndola. Por otro lado, la distancia entre puntos a emplear debe estar entre los 30 y 60 µm, y no por debajo porque tener dos puntos consecutivos del láser tan juntos podría adherir partículas adyacentes y aumentar la rugosidad.

Si comparamos los resultados de las piezas con los valores de downskin por defecto (0P) y sin parámetros de downskin (19P), se observa que se ha conseguido mejorar la rugosidad con los nuevos parámetros empleados. A continuación, se muestra una tabla con todos los valores de rugosidades, así como la gráfica que los representa.

Tabla 11. Valores de rugosidad de las muestras 0P - 19P

	Muestra	Sa (µm)
0P	0P	43,401
	1P	34,995
1P - 6P	2P	33,635
	3P	34,792
	4P	45,881
	5P	38,736
	6P	38,353
	7P	34,407
7P - 12P	8P	31,35
	9P	34,055
	10P	34,948
	11P	47,952
	12P	42,981
	13P	34,116
13P - 18P	14P	33,146
	15P	33,873
	16P	37,081
	17P	38,39
	18P	40,168
	19P	78,474

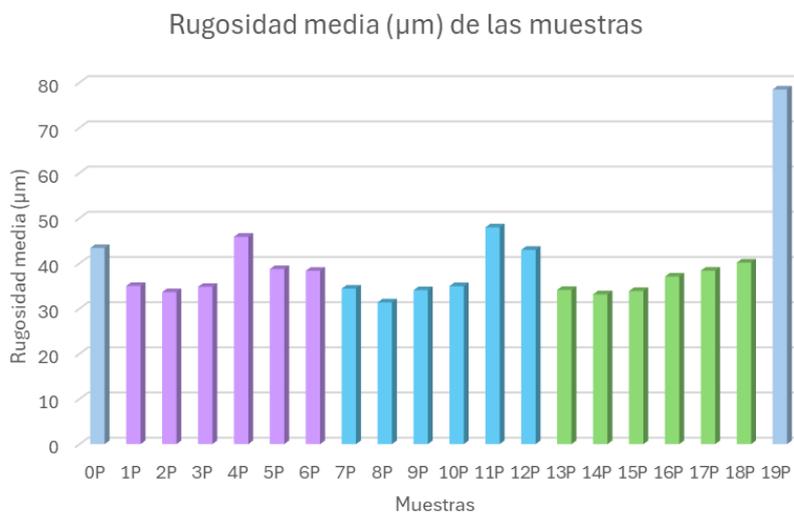


Figura 74. Gráfica de la rugosidad de las muestras 0P - 19P

La muestra 19P presenta el valor más alto de rugosidad, siendo más del doble de la mayoría de las muestras. Esto demuestra que la rugosidad de las superficies de downskin se mejora al emplear valores de densidad de energía más pequeños.

11.4.2 Problemas encontrados en el experimento 4

La geometría diseñada para el experimento 4 permite obtener una gran cantidad de datos por cada muestra. Sin embargo, tiene un problema que debería ser solucionado en próximos experimentos. Este problema aparece en las paredes de 65°, 70°, 75° y 80°. Estas paredes no llegan al bloque central, sino que tienen un voladizo completamente horizontal que lo une al bloque central. Al ser horizontal, esta zona no se fabrica correctamente sin soportes. Para evitar el uso de soportes más largos, se debería modificar la geometría de la pieza de tal forma que las paredes se extiendan hasta la zona de soportes.

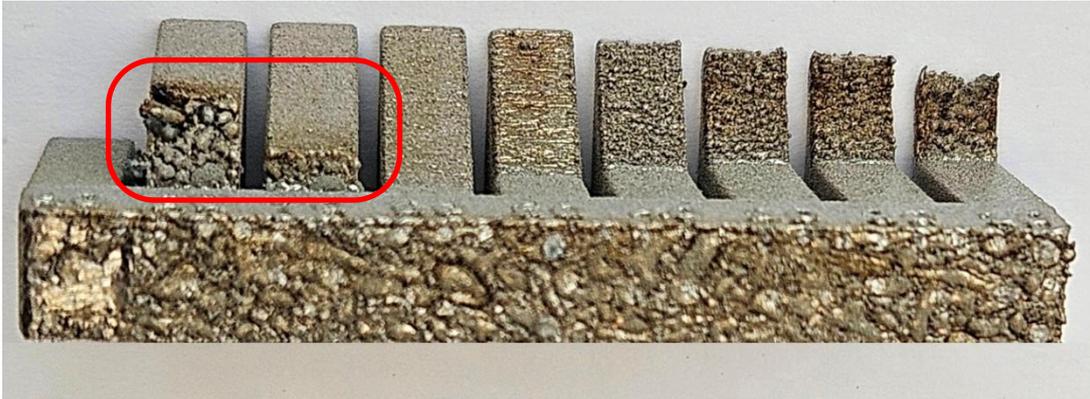


Figura 75. Problema de la geometría del experimento 4

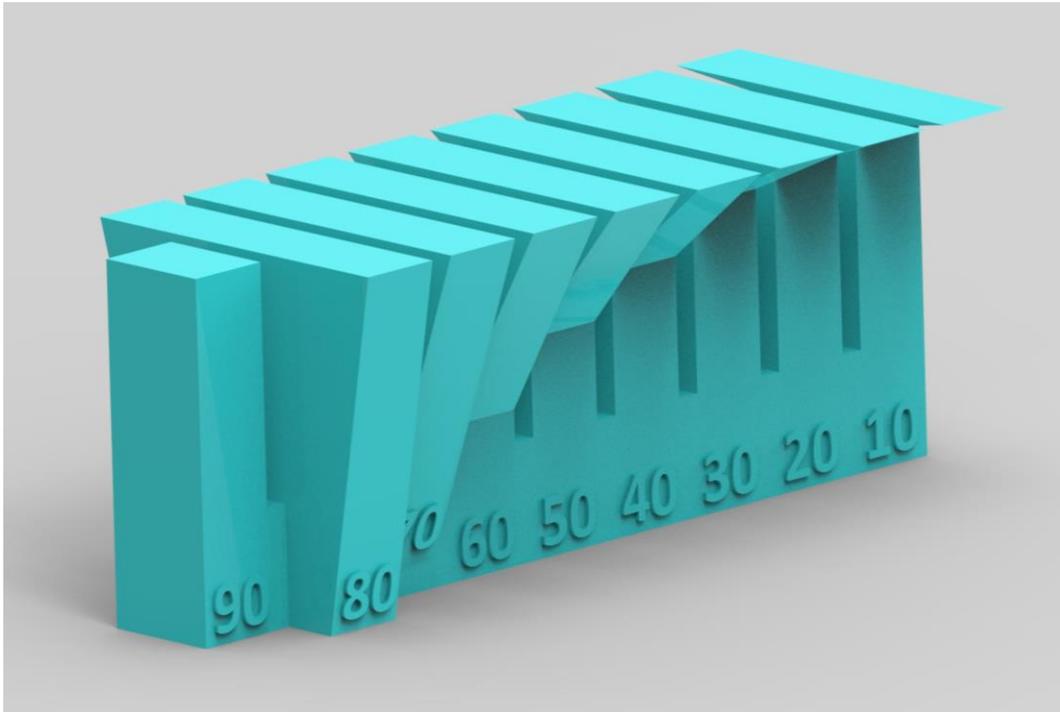


Figura 76. Nueva geometría propuesta de la pieza del experimento 4

Esta nueva geometría permitiría fabricar correctamente la esquina de las paredes que, de la otra forma, no se había llegado a fundir y presentaba defectos.

11.5 División de la pieza en regiones con el software de Dyndrite

Dyndrite es un software que se emplea para preparar el proceso de fabricación (posicionando la pieza sobre la plataforma, definiendo los soportes a emplear, escogiendo los parámetros de fabricación...). Este programa tiene una ventaja frente al resto de softwares empleados y es que permite definir regiones en las piezas para poder variar los parámetros de fabricación en cada una de estas regiones. De esta forma, se puede tener un control mucho más preciso de los parámetros que intervienen en el proceso. En este proyecto se ha investigado esta funcionalidad de Dyndrite y se ha diseñado un programa que permite dividir las zonas de downskin de la pieza del experimento anterior en distintas capas, para poder modificar los parámetros de cada capa.

A modo de ejemplo, se ha tomado la geometría mejorada del último experimento y se han creado 4 regiones de downskin y una de core. En cada una de estas regiones se podría escoger un valor diferente para la potencia, tiempo de exposición, distancia entre puntos, distancia de hatching...

El software de Dyndrite tiene la interfaz todavía en desarrollo, por lo que lo más conveniente es programar el proceso de fabricación primero con un código de Python, y simularlo en Dyndrite. A continuación, se muestran algunas imágenes con fragmentos del programa de Python que se ha desarrollado para dividir la zona de downskin en capas y asignar parámetros de fabricación diferente para cada una de esas regiones. También se añaden imágenes de Dyndrite y QuantAM para explicar mejor cada parte del programa.

En primer lugar, se debe abrir el programa de Dyndrite, configurar el entorno de trabajo y las medidas de nuestra máquina. También se debe importar el archivo con la pieza que se desea fabricar y posicionarla en la plataforma de fabricación (Figura 77 y Figura 78).

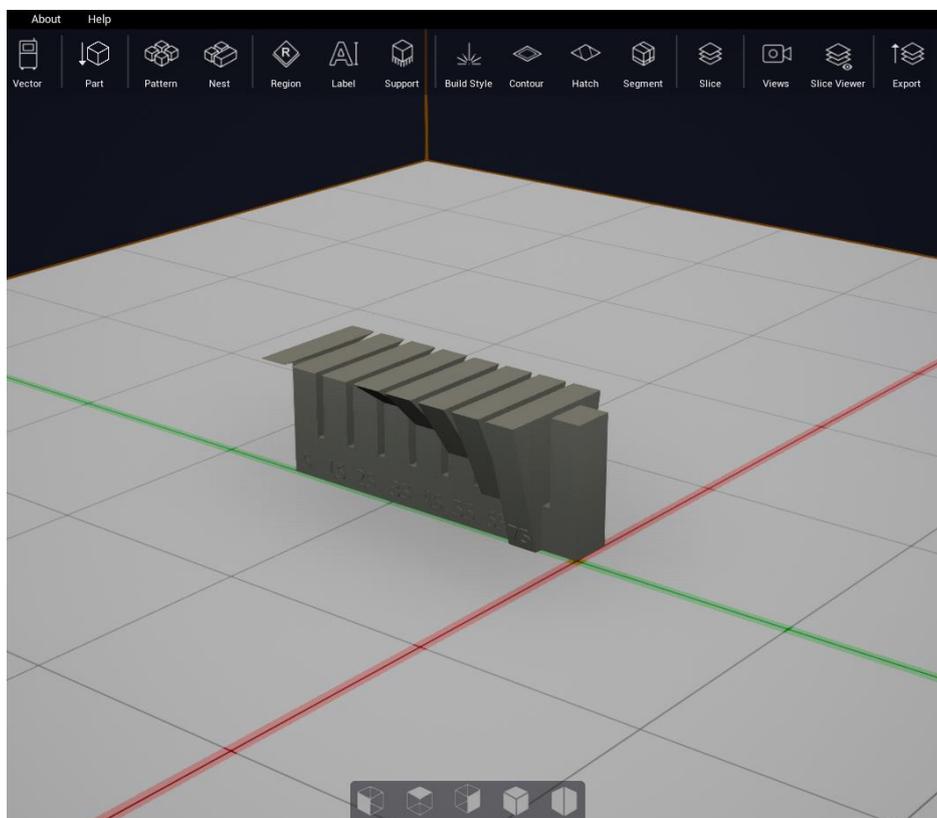


Figura 77. Pieza posicionada sobre la plataforma de fabricación en Dyndrite

```
1 # Find the file location for the Dyndrite Module
2 import time, os, sys
3
4 sys.path.insert(0, r'C:/Users/Public/Documents/Dyndrite/Python')
5
6 # open Dyndrite LPBF Pro
7 import dyndrite
8 try:
9     # tries to use an existing instance of Dyndrite LPBF Pro
10    dyn = dyndrite.connect(connect_attempts=2)
11 except:
12    # if it fails, opens new instance of Dyndrite LPBF Pro
13    dyn = dyndrite.launch()
14
15 import math
16
17
18 # Create a new VectorProcess object and store its Zoner in a local variable
19 vp = dyn.new_process(dyn.VectorProcess)
20 zoner = vp.zoner
21
22 BEAM_COMP = .133 # mm
23 INFILL = BEAM_COMP + .11 # mm
24 LAYER_THICKNESS = 0.06 # mm
25
26
27 # Set up the printer
28 dyn.printer.plate = (250, 250)
29 dyn.printer.height = 350.0
30 dyn.printer.plate_thickness = 20.0
31 dyn.printer.display_name = "RenAM 500Q"
32
33
34 # Import the part
35 prt0 = dyn.ops.import_part(path=r"C:/Users/CFAA/Desktop/stl varios/Downskin_Dima.stl",
36                             auto_center=False,
37                             transform=None,
38                             translate_only=None,
39                             brep_sampling_parameters=None)
40 prt0_rgn0 = dyn.part[0].region[0]
41
42
43 # dyn.ops.translate(prt0, dyn.Vector3(0.000000,0.000000,0.000000))
44 dyn.ops.place(dyn.part[0], dyn.Vector3(0.000000, 0.000000, 0.000000))
45
```

Figura 78. Primer fragmento del programa de Python: abrir el programa e importar la pieza


```
77 # Modulated CW scans are composed of discrete exposure points along a hatch vector.
78 # As Renishaw machines use a modulated CW exposure instead of a continuous vector
79 # scan, we will create a different type of build style with different options
80 # to the usual zoner.new_build_style().
81 # Modulated CW scans can be described using point jump delay, point distance,
82 # and point exposure time, instead of just scan speed.
83 # These parameters allow us to control the exposure profile of each exposure
84 # point.
85 # We will create modulated build styles using zoner.new_modulated_build_style()
86 # for use in the Core and Downskin zones of the part.
87 core_bst = zoner.new_modulated_build_style(laser_focus_mm=0,
88                                             laser_index=1,
89                                             laser_power_w=400,
90                                             point_jump_delay_us=20,
91                                             point_distance_um=30,
92                                             point_exposure_us=20)
93
94 ds1_bst = zoner.new_modulated_build_style(laser_focus_mm=0,
95                                             laser_index=1,
96                                             laser_power_w=125,
97                                             point_jump_delay_us=20,
98                                             point_distance_um=80,
99                                             point_exposure_us=50)
100 ds2_bst = zoner.new_modulated_build_style(laser_focus_mm=0,
101                                             laser_index=1,
102                                             laser_power_w=250,
103                                             point_jump_delay_us=20,
104                                             point_distance_um=60,
105                                             point_exposure_us=40)
106 ds3_bst = zoner.new_modulated_build_style(laser_focus_mm=0,
107                                             laser_index=1,
108                                             laser_power_w=350,
109                                             point_jump_delay_us=20,
110                                             point_distance_um=30,
111                                             point_exposure_us=20)
112 ds4_bst = zoner.new_modulated_build_style(laser_focus_mm=0,
113                                             laser_index=1,
114                                             laser_power_w=450,
115                                             point_jump_delay_us=20,
116                                             point_distance_um=20,
117                                             point_exposure_us=20)
118
119
```

Figura 81. Cuarto fragmento del programa de Python: crear los estilos de fabricación

```
120 # Create the segments, and assign the modulated build styles to each
121 ds_sgt0 = zoner.add_segment(zone_type=zoner.PartZoneType.DOWNSKIN,
122                             hatch_style=ds1_bst,
123                             perimeter_style=ds1_bst,
124                             offset_styles=[ds1_bst, ds1_bst],
125                             color=(93, 173, 226))
126 ds_sgt1 = zoner.add_segment(zone_type=zoner.PartZoneType.DOWNSKIN,
127                             hatch_style=ds2_bst,
128                             perimeter_style=ds2_bst,
129                             offset_styles=[ds2_bst, ds2_bst],
130                             color=(155, 89, 182))
131 ds_sgt2 = zoner.add_segment(zone_type=zoner.PartZoneType.DOWNSKIN,
132                             hatch_style=ds3_bst,
133                             perimeter_style=ds3_bst,
134                             offset_styles=[ds3_bst, ds3_bst],
135                             color=(46, 204, 113))
136 ds_sgt3 = zoner.add_segment(zone_type=zoner.PartZoneType.DOWNSKIN,
137                             hatch_style=ds4_bst,
138                             perimeter_style=ds4_bst,
139                             offset_styles=[ds4_bst, ds4_bst],
140                             color=(231, 76, 60))
141
142 core_sgt0 = zoner.add_segment(zone_type=zoner.PartZoneType.CORE,
143                              hatch_style=core_bst,
144                              perimeter_style=core_bst,
145                              offset_styles=[core_bst, core_bst],
146                              color=(140, 140, 140))
147
148
149 # Set Core Segment
150 zoner.set_part_core(part=dyn.part[0], seg=core_sgt0)
151
152
153 # Segment the model
154 prt0_seg0 = zoner.segment(part=dyn.part[0], priority_list=[(ds_sgt0, 2),
155                                                         (ds_sgt1, 2),
156                                                         (ds_sgt2, 2),
157                                                         (ds_sgt3, 2)])
158
159
160 # Set Global Slicing Parameters
161 vp.slicing_thickness = LAYER_THICKNESS
162 vp.slicing_resolution = dyn.Vector2(0.06, 0.06)
163
164 vp.finalize()
165
```

Figura 82. Quinto fragmento: asignar los estilos de fabricación a cada segmento y segmentar la pieza

Una vez finalizado el programa, se puede observar la manera en la que se ha dividido la pieza en cuatro capas de downskin y una zona central de core.

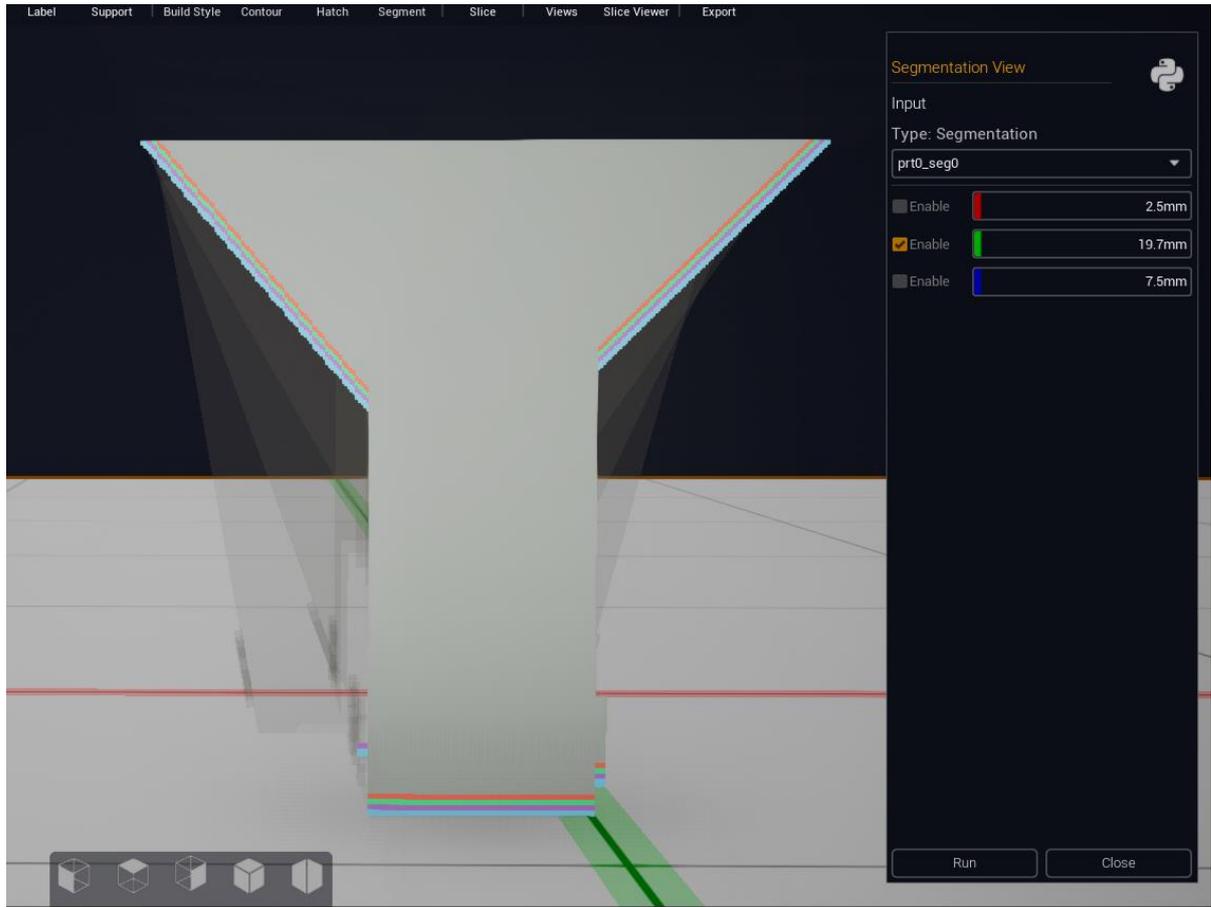


Figura 83. Segmentación de la pieza en el programa de Dyndrite

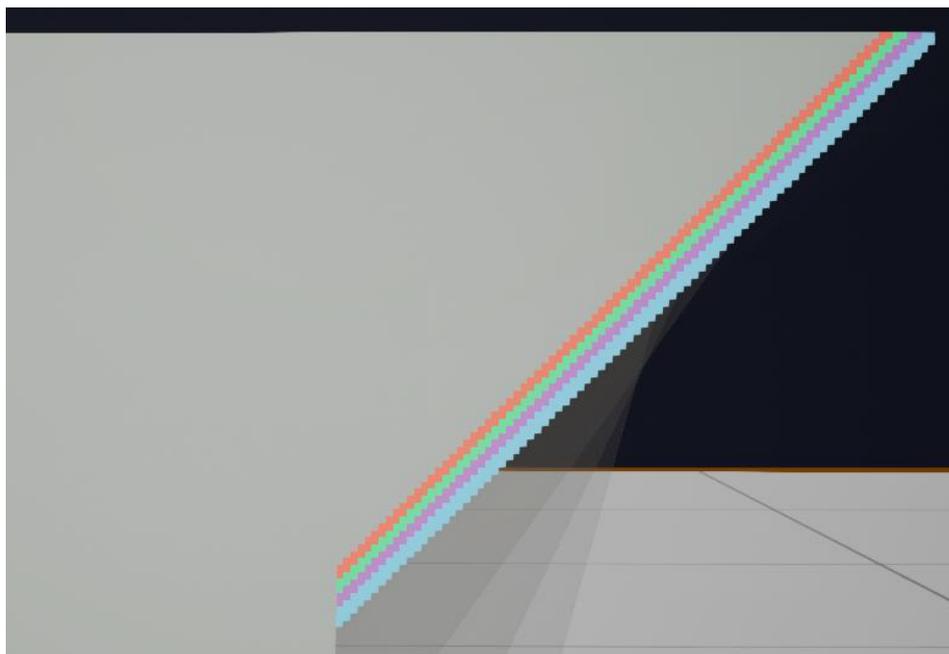


Figura 84. Vista detalle de la segmentación de la pieza

Tras haber realizado la segmentación y al generar el archivo con las trayectorias y los parámetros del láser, se puede visualizar el resultado en el programa de QuantAM. Aquí aparecen las diferentes capas de downskin dibujadas cada una con un color para poder visualizarlo mejor. La zona central de core se muestra también en verde.

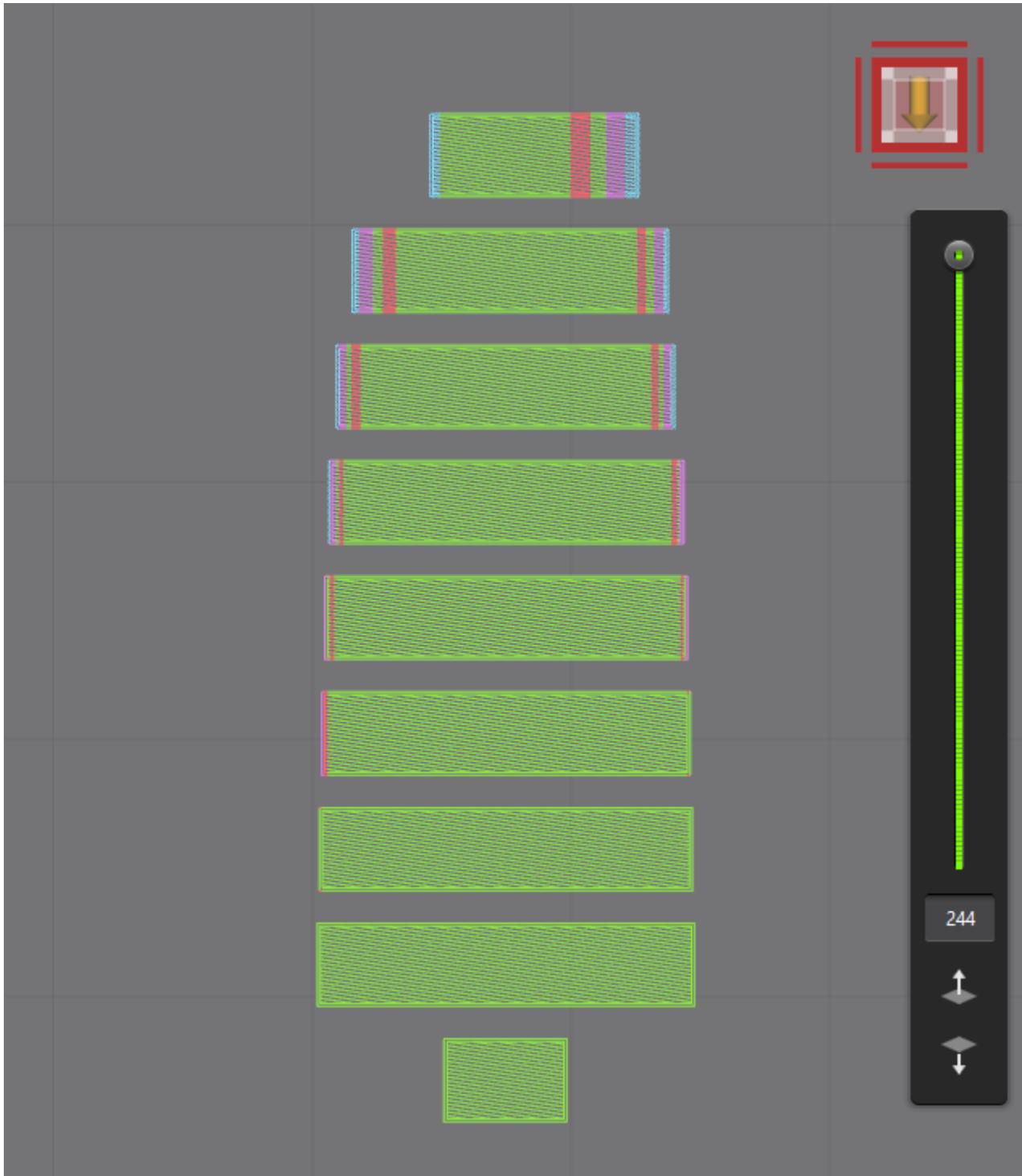


Figura 85. Trayectorias en el software de QuantAM

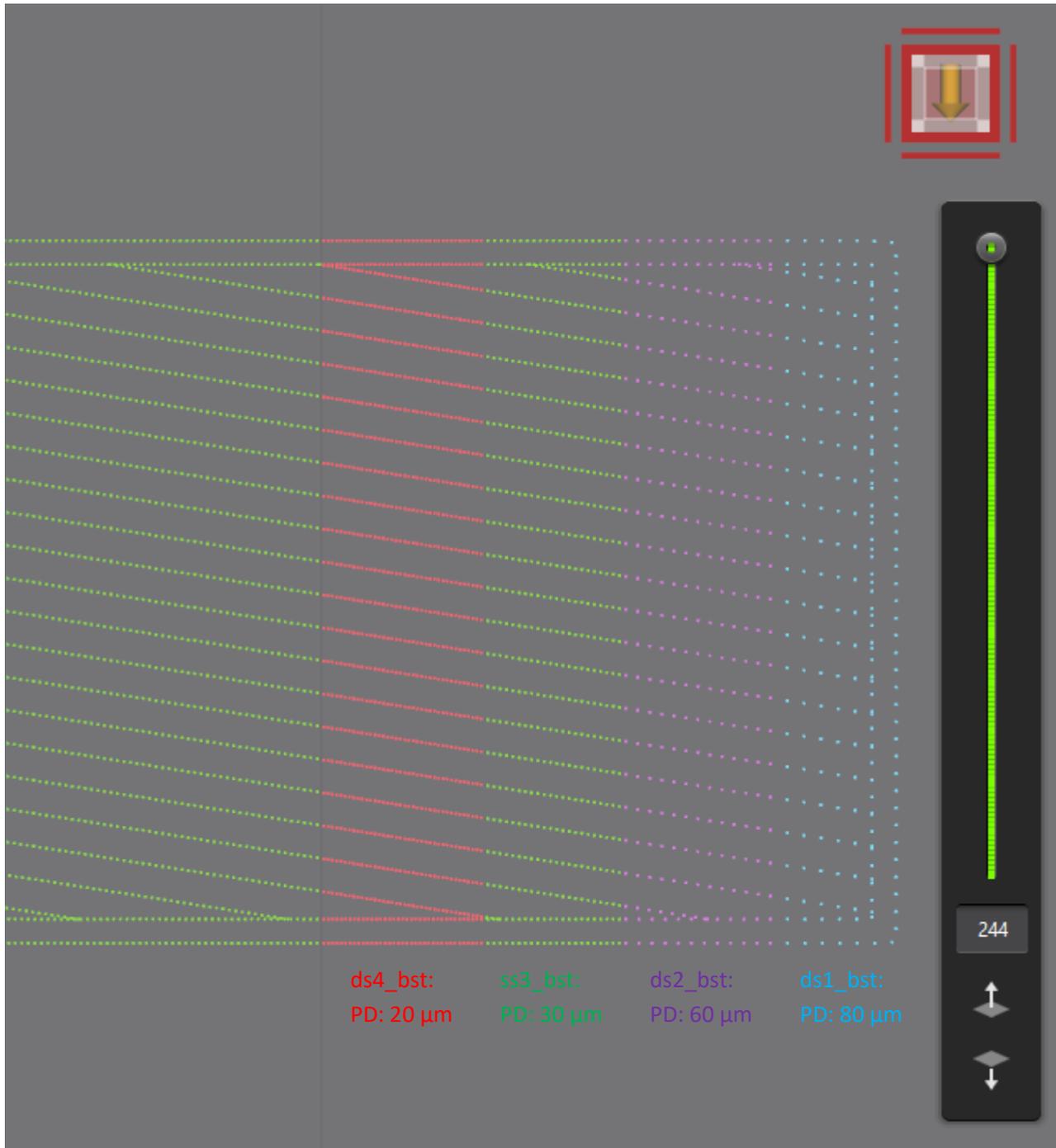


Figura 86. Vista detalle de las trayectorias en el software de QuantAM

En la vista detalle se observan las trayectorias dibujadas con los puntos del láser. De esta manera se puede apreciar claramente que la distancia entre puntos de cada zona de downskin es diferente, tal y como se había programado en los diferentes estilos de fabricación. Si miramos los parámetros de fabricación para cada zona en el programa de QuantAM, también se pueden ver y modificar los valores de potencia, distancia entre puntos, tiempo de exposición...de cada zona.

ds1_bst: P: 125 W, PD: 80 μm

ds2_bst: P: 250 W, PD: 60 μm

ds3_bst: P: 350 W, PD: 30 μm

Default Build Parameters

Continuous Laser

Laser Power 125 W

Laser Focus 0 mm

Laser Speed 1.15 m/s

Point Distance 80 μm

Exposure Time 50 μs

Point Delay 20 μs

Jump Speed NULL mm/s

Jump Delay NULL μs

Apply

Default Build Parameters

Continuous Laser

Laser Power 250 W

Laser Focus 0 mm

Laser Speed 1 m/s

Point Distance 60 μm

Exposure Time 40 μs

Point Delay 20 μs

Jump Speed NULL mm/s

Jump Delay NULL μs

Apply

Default Build Parameters

Continuous Laser

Laser Power 350 W

Laser Focus 0 mm

Laser Speed 0.75 m/s

Point Distance 30 μm

Exposure Time 20 μs

Point Delay 20 μs

Jump Speed NULL mm/s

Jump Delay NULL μs

Apply

ds4_bst: P:450W, PD: 20 μm

core_bst: P:400W, PD: 30 μm

Default Build Parameters

Continuous Laser

Laser Power 450 W

Laser Focus 0 mm

Laser Speed 0.5 m/s

Point Distance 20 μm

Exposure Time 20 μs

Point Delay 20 μs

Jump Speed NULL mm/s

Jump Delay NULL μs

Apply

Default Build Parameters

Continuous Laser

Laser Power 400 W

Laser Focus 0 mm

Laser Speed 0.75 m/s

Point Distance 30 μm

Exposure Time 20 μs

Point Delay 20 μs

Jump Speed NULL mm/s

Jump Delay NULL μs

Apply

Figura 87. Estilos de fabricación en el programa de QuantAM

El software de Dyndrite permite tener más control sobre los parámetros que intervienen en el proceso en cada zona de la pieza. En el futuro, cuando se conozcan cuáles son los parámetros óptimos para mejorar la rugosidad de las piezas pero manteniendo la fabricabilidad, se podrán emplear programas como este para obtener piezas con geometrías complejas y buenas propiedades mecánicas.

12 Aspectos económicos

Este apartado se centra en el análisis y descripción de los gastos asumidos durante el desarrollo del proyecto. Por un lado, el presupuesto tiene en cuenta costes personales, como son el tiempo invertido de la estudiante investigadora (ingeniera industrial), del director de proyecto y del técnico de LPBF. Por otro lado, también se consideran los costes materiales relacionados con las materias primas empleadas durante la fabricación (polvo metálico), así como la maquinaria, la energía y los consumibles requeridos.

12.1 Presupuesto

12.1.1 Personal

Este apartado recoge las horas invertidas por las personas que han participado en el proyecto, el coste por hora de cada una de ellas, y el coste total. Los valores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 12. Presupuesto personal

Persona	Número de horas (h)	Coste (€/h)	Total (€)
Ingeniera industrial	600	15	9.000
Director de proyecto	20	35	700
Técnico LPBF	50	30	1.500
Total (€)			11.200

12.1.2 Material

El presupuesto material se centra en el cálculo de los gastos relacionados con el polvo metálico de Inconel 718, el argón necesario durante el proceso, el coste de la maquinaria empleada durante la fabricación y para el análisis posterior de las piezas y de los softwares utilizados.

Hay que tener en cuenta que el presupuesto que describe los costes de las licencias de los softwares de diseño del proceso de fabricación se ha realizado con valores aproximados. No se conoce con exactitud el precio de dichos programas por lo que se han considerado costes parecidos a otros softwares similares.

Tabla 13. Presupuesto de la materia prima

Material	Cantidad	Coste	Total (€)
Polvo Inconel 718	3 kg	50 €/kg	150
Argón	1 u	150 €/u	150
Total (€)			300

Tabla 14. Presupuesto de la maquinaria

Maquinaria	Número de horas (h)	Coste (€/h)	Total (€)
Máquina RenAM500-S	50	25	1.250
Microscopio óptico	10	10	100
Microscopio SEM	20	20	400
Total (€)			1.750

Tabla 15. Presupuesto del equipo informático

Programa informático	Número de horas (h)	Coste (€/h)	Total (€)
QuantAM	30	5	150
Dyndrite	20	4	80
Microsoft Office	300	0,25	75
Total (€)			305

12.2 Presupuesto total

La siguiente tabla recoge el total de los presupuestos de personal, material, maquinaria y equipos informáticos. Para ello, se han sumado los valores totales previamente calculados. El presupuesto del proyecto del *Análisis de parámetros de downskin y support-free structures en el proceso de laser powder bed fusión (LPBF)* es de 16.401,55€, I.V.A. incluido.

Tabla 16. Presupuesto total del proyecto

Tipo de gasto	Coste (€)
Personal	11.200,00
Material	300,00
Maquinaria	1.750,00
Equipos informáticos	305,00
Base proyecto (€)	13.555,00
I.V.A. (21%)	2.846,55
Total Proyecto (€)	16.401,55

13 Conclusiones y futuras líneas de investigación

13.1 Conclusiones

Los experimentos realizados en este trabajo confirman que la calidad de las superficies de downskin en las piezas fabricadas por fusión láser por lecho de polvo (LPBF) puede ser mejorada mediante la variación de parámetros del proceso. La rugosidad en las superficies de downskin depende de la geometría de la pieza a fabricar, de la colocación sobre la plataforma durante el diseño del proceso, de los parámetros del proceso (potencia, modo de trabajo del láser: continuo o pulsado, la velocidad de escaneo, el espesor de capa de polvo...). Este trabajo se centra en la modificación de algunos de estos parámetros, manteniendo otros fijos, para poder analizar el efecto que tienen sobre la calidad de las piezas.

En primer lugar, se observa que la disminución de la densidad de energía tiene un impacto positivo en la rugosidad de las superficies de downskin. Esta densidad de energía volumétrica depende de la potencia, el tiempo de exposición de cada punto del láser, la distancia entre puntos, la distancia de borde y contorno y el espesor de capa de polvo. Los tres primeros experimentos han servido como una primera aproximación para diseñar el cuarto y último experimento que ha empleado una geometría mejorada para poder medir la rugosidad de varias superficies en una única pieza.

En el cuarto experimento, al comparar la rugosidad de una pieza en la que no se han empleado parámetros de downskin con otra en la que sí se ha hecho, se observa claramente cómo la calidad de las superficies mejora reduciendo la densidad de energía. Los parámetros que se modifican y cuyo impacto se analiza son la potencia y la distancia entre puntos, y se mantienen fijos el tiempo de exposición, el espesor de capa y la distancia de contorno y borde. Además, los valores de energía volumétrica van en orden decreciente desde el exterior de la pieza (borde) hacia el interior (hatches) pasando por un borde adicional y el contorno. Se decide realizarlo de esta forma ya que los valores altos de densidad de energía son los que provocan que el polvo metálico se adhiera a la pieza, y es mejor ir reduciéndolos de manera gradual del interior hacia el exterior de la superficie.

De este cuarto experimento se concluye que se deben emplear valores de densidad de energía volumétrica bajos (de unos 20 J/mm^3 en la zona de hatches) e ir disminuyendo este valor hacia el exterior de la sección. También se observa que no conviene tomar valores menores porque esto podría afectar a la fabricabilidad de las piezas, ya que usar potencias muy bajas o distancias entre puntos del láser muy altas (densidades de energía muy bajas) provocaría que el polvo no se fundiera correctamente y que la pieza no se fabricara con la geometría deseada. Es importante encontrar un equilibrio entre la reducción de la rugosidad y mantener unas buenas propiedades de las piezas y asegurar su fabricabilidad.

El software de Dyndrite permite llevar un paso más allá la modificación de los parámetros del proceso para mejorar la calidad de las piezas ya que se pueden definir regiones diferenciadas con parámetros diferentes cada una de ellas, en lugar de tener que emplear los mismos parámetros para todas las zonas de una pieza. Esto permite fabricar piezas con geometrías complejas sin la necesidad de emplear soportes y mejorando la calidad de las superficies.

El proceso de Laser Powder Bed Fusion es una tecnología de fabricación que ha tirado abajo muchas de las limitaciones que tenían los procesos de fabricación convencionales. Es un proceso que permite diseñar piezas con geometrías complejas o incluso con cavidades internas que suponen un avance muy grande para la

industria de la aeronáutica y la aeroespacial entre otras. Es importante seguir aprendiendo y mejorando el proceso para que se puedan conseguir resultados mucho mejores sin la necesidad de una gran cantidad de post-procesado o de material sobrante en el empleo de soportes durante la fabricación. Esto se puede conseguir con experimentos como los desarrollados en este trabajo y mediante un análisis exhaustivo de todos los resultados obtenidos.

13.2 Futuras líneas de investigación

Las futuras líneas de investigación de este trabajo podría ser la obtención de más datos de rugosidad de las piezas ya fabricadas en el último experimento. En este cuarto experimento se han tomado medidas de rugosidad en una única pared (la de 35°) pero en esta misma pieza hay disponibles más paredes que se podrían medir. Con los datos extraídos de todas las paredes, se podría ver cuáles son los parámetros de potencia y distancia entre puntos óptimos para cada una de ellas.

Por otro lado, al finalizar este cuarto experimento se observó que la geometría empleada no era la mejor ya que había una zona de las paredes con mayores ángulos de inclinación que no se estaban fabricando correctamente al ser completamente horizontales y no tener soportes. Se propone emplear la nueva geometría mejorada diseñada al final del cuarto experimento.

Una vez se tengan los valores de potencia y distancia entre puntos óptimos en cuanto a la rugosidad de las superficies de downskin, se puede pasar a modificar el resto de los parámetros (el espesor de capa, el tiempo de exposición...) y analizar el efecto que tienen sobre la calidad de las piezas. En paralelo con esto, también se podría seguir estudiando el software de Dyndrite ya que puede suponer un avance enorme en el diseño del proceso de fabricación y la producción de piezas sin soportes o con paredes con ángulos de inclinación respecto a la horizontal muy pequeños.

14 Bibliografía

- [01] J. P. Oliveira, A. D. Lalonde, and J. Ma, “Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing.” vol. 193. Elsevier BV, Apr. 30, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108762.
- [02] E. Torresani, M. Carrillo, C. Haines, D. Martin, and E. Olevsky, “Fabrication of powder components with internal channels by spark plasma sintering and additive manufacturing.” vol. 43, no. 3. Elsevier BV, p. 1117, Nov. 04, 2022, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.11.008.
- [03] S. C. Lieber, A. P. Varghese, R. Tarantino, and A. Tafuni, “Additive manufacturing for plastic extrusion die tooling: A numerical investigation.” vol. 41. Elsevier BV, p. 401, Jan. 16, 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.01.003.
- [04] A. L. Jardini, M. A. Larosa, A. Kaasi, and P. Kharmandayan, “Additive Manufacturing in Medicine.” Oxford: Elsevier, 2017, pp. 300–320.
- [05] C. M. Ferreira, L. Reis, M. J. Carmezim, and R. Cláudio, “Additive Manufacturing of Aluminium Alloys in the Aeronautical Sector – A Bibliometric Analysis.” vol. 53. Elsevier BV, p. 254, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.01.031.
- [06] S. Kumar, “Definition of a Process and Additive Manufacturing,” in *Additive Manufacturing Processes*, 1st Ed. Springer Cham, 2020, ch. 1, sec. 2. doi.org/10.1007/978-3-030-45089-2.
- [07] P. Gradl, A. Cervone, and P. Colonna, “Influence of build angles on thin-wall geometry and surface texture in laser powder directed energy deposition.” vol. 234. Elsevier BV, Sep. 22, 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.112352.
- [08] Renishaw. “Sistemas de fabricación aditiva metálica (impresión 3D) RenAM 500.” Renishaw.es. <https://www.renishaw.es/es/sistemas-de-fabricacion-aditiva-metalica-impresion-3d-renam-500--37011> (accessed 08 April 2024).
- [09] Renishaw. “Software de preparación de fabricación QuantAM.” Renishaw.es. <https://www.renishaw.es/es/software-de-preparacion-de-fabricacion-quantam--35455> (accessed 08 April 2024).
- [10] Dyndrite. “Introduction to Dyndrite LPBF Pro.” Dyndrite.com. <https://www.dyndrite.com/> (accessed 08 April 2024).
- [11] Naciones Unidas. “17 Objetivos para transformar nuestro mundo: Objetivos y metas de desarrollo sostenible.” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> (accessed 13 May 2024)
- [12] 3D Experience. “Introduction to 3D printing - additive processes.” make.3dexperience.3ds.com. <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion> (accessed 10 April 2024).
- [13] C. Chua, Y. Liu, R. J. Williams, C. K. Chua, and S. L. Sing, “In-process and post-process strategies for part quality assessment in metal powder bed fusion: A review.” vol. 73. Elsevier BV, p. 75, Jan. 30, 2024, doi: 10.1016/j.jmsy.2024.01.004.

- [14] F. Ceccanti, A. Giorgetti, and P. Citti, "A Support Structure Design Strategy for Laser Powder Bed Fused Parts." vol. 24. Elsevier BV, p. 667, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2020.02.059.
- [15] S. Weber, J. Montero, M. Bleckmann, and K. Paetzold, "PARAMETERS ON SUPPORT STRUCTURE DESIGN FOR METAL ADDITIVE MANUFACTURING," vol. 1. Cambridge University Press (CUP), May 01 2020, doi: 10.1017/dsd.2020.14.
- [16] Susana S. "Guía completa: Fusión láser por lecho de polvo (L-PBF), ¡te explicamos todo!" 3dnatives.com <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/> (accessed 09 April 2024).
- [17] B. Whip, L. Sheridan, and J. Gockel, "The effect of primary processing parameters on surface roughness in laser powder bed additive manufacturing." vol. 103, no. 9–12. Springer Science and Business Media LLC, p. 4411, May 23, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03716-z.
- [18] F. I. Jamhari et al., "Influence of heat treatment parameters on microstructure and mechanical performance of titanium alloy in LPBF: A brief review." vol. 24. Elsevier BV, p. 4091, Apr. 13, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.090.
- [19] Bocanegra-Bernal, M.H. "Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics" in *Journal of Materials Science*, vol. 39, Springer Science, p. 6399–6420, Nov, 200, doi: 10.1023/B:JMSC.044878.11441.90.
- [20] J. Fiocchi, C. A. Biffi, M. Elnemr, J. Shipley, A. Tuissi, and R. Casati, "Hot isostatic pressing and heat treatments of LPBFed CoCuFeMnNiTi0.13 high-entropy alloy: microstructure and mechanical properties." vol. 26. Elsevier BV, p. 9127, Sep. 26, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.223.
- [21] I. Yadroitsava, A. Du Plessis, and I. Yadroitsev, "Bone regeneration on implants of titanium alloys produced by laser powder bed fusion: A review." in *Titanium for Consumer applications*, Elsevier, p. 197-233, 2019, doi: 10.1016/b978-0-12-815820-3.00016-2.
- [22] J. Kadkhodapour, A. S. Mirhakimi, and H. Montazerian, "Structural defects and mechanical properties of additively manufactured parts." in *Quality Analysis of Additively Manufactured Metals*, Elsevier, p. 119-172, 2023, doi: 10.1016/b978-0-323-88664-2.00006-3.
- [23] A. Charles, A. Elkaseer, L. Thijs, V. Hagenmeyer, and S. Scholz, "Effect of Process Parameters on the Generated Surface Roughness of Down-Facing Surfaces in Selective Laser Melting." in *Applied Sciences*, vol. 9, no. 6. MDPI AG, Mar. 26, 2019, doi: 10.3390/app9061256.
- [24] H. C. Hyer and C. M. Petrie, "Effect of powder layer thickness on the microstructural development of additively manufactured SS316." vol. 76. Elsevier BV, p. 666, Mar. 04, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.02.047.
- [25] F. R. Kaschel, S. Keaveney, and D. P. Dowling, "Comparison between continuous and modulated wave laser emission modes for the selective laser melting of Ti-6Al-4V: Dimensional accuracy, microstructure and mechanical behaviour." vol. 55. Elsevier BV, Apr. 14, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102825.

- [26] C. Guo et al., “A comparing study of defect generation in IN738LC superalloy fabricated by laser powder bed fusion: Continuous-wave mode versus pulsed-wave mode.” vol. 90. Elsevier BV, p. 45, Apr. 24, 2021, doi: 10.1016/j.jmst.2021.03.006.
- [27] V. Viale, J. Stavridis, A. Salmi, F. Bondioli, and A. Saboori, “Optimisation of downskin parameters to produce metallic parts via laser powder bed fusion process: an overview.” vol. 123, no. 7–8. Springer Science and Business Media LLC, p. 2159, Nov. 02, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10314-z.
- [28] Z. Wang, Z. Yang, F. Liu, and W. Zhang, “Influence of the scanning angle on the grain growth and mechanical properties of Ni10Cr6W1Fe9Ti1 HEA fabricated using the LPBF–AM method.” vol. 864. Elsevier BV, Jan. 05, 2023, doi: 10.1016/j.msea.2023.144596.
- [29] S. Sendino, S. Martinez, F. Lartategui, J. Diaz, A. Lamikiz, and E. Ukar, “Surface roughness dependant factors in metal powder bed fusion processes,” in *Joint Special Interest Group meeting between Euspen and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing Ecole Centrale de Nantes*, France, September 2019.
- [30] A. G. Demir, P. Colombo, and B. Previtali, “From pulsed to continuous wave emission in SLM with contemporary fiber laser sources: effect of temporal and spatial pulse overlap in part quality.” vol.91, no.5-8. Springer Science and Business Media LLC, p. 2701, Jan. 10, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9948-7.
- [31] D. Wang, Y. Yang, Z. Yi, and X. Su, “Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process.” vol. 65, no. 9–12. Springer Science and Business Media LLC, p. 1471, Jun. 16, 2012, doi: 10.1007/s00170-012-4271-4.
- [32] Q. B. Nguyen, D. N. Luu, S. M. L. Nai, Z. Zhu, Z. Chen, and J. Wei, “The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts.” vol. 18, no. 3. Springer Science and Business Media LLC, p. 948, Apr. 18, 2018, doi: 10.1016/j.acme.2018.01.015.
- [33] L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon and S. Wiener, “Additive manufacturing of metals: The Technology, Materials, Design and Production.” Springer Series in Advanced Manufacturing, p. 168, May. 18, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-55128-9.
- [34] J. Grünwald, P. Clarkson, R. Salveson, G. Fey, and K. Wudy, “Influence of Pulsed Exposure Strategies on Overhang Structures in Powder Bed Fusion of Ti6Al4V Using Laser Beam.” vol. 11, no. 7. MDPI AG, Jul. 15, 2021, doi: 10.3390/met11071125.
- [35] Calignano and Minetola, “Influence of Process Parameters on the Porosity, Accuracy, Roughness, and Support Structures of Hastelloy X Produced by Laser Powder Bed Fusion.” vol. 12, no. 19. MDPI AG, Sep. 27, 2019, doi: 10.3390/ma12193178.
- [36] H. M. Khan, M. H. Dirikolu, and E. Koç, “Parameters optimization for horizontally built circular profiles: Numerical and experimental investigation,” vol. 174. Elsevier BV, p. 521, Dec. 01, 2018, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.08.095.
- [37] J. J. Babu, M. Mehrpouya, T. C. Pijper, G. Willemsen, and T. Vaneker, “An Experimental Study of Downfacing Surfaces in Selective Laser Melting,” in *Advanced Engineering Materials*, vol. 24, no. 8. Wiley, Apr. 22, 2022, doi: 10.1002/adem.202101562.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO